

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky**

**Koncepce algoritmu pro optimalizaci kvality elektrické energie v  
ostrovní síti**

**The Development of the Tool for the Power Quality Parameters  
Optimization in a Off-Grid System**

**2018**

**Bc. Jindřich Coufal**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jindřich Coufal**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Koncepce algoritmu pro optimalizaci kvality elektrické energie v ostrovní síti**  
**The Development of the Tool for the Power Quality Parameters Optimization in a Off-Grid System**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Kategorizace spotřebičů dle úrovně výkonu a priority použití
3. Návrh algoritmu pro optimalizaci parametrů kvality elektrické energie v ostrovní síti
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Cenek, M. a kol.: Obnovitelné zdroje energie, 2. upr. a dopln. vydání, Praha, FCC Public 2001, ISBN 80-901985-8-9
- [2] Štekl, J.: Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice, Praha 2003
- [3] Toman, P., Mišák, S., Drápela, J.: Provoz distribučních soustav, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04935-8
- [4] Mastný, P., Mišák, S., Drápela, J.: Obnovitelné zdroje energie, mČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04937-2
- [5] PŘÍLOHA 4 PPDS: PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ [6] ČSN EN 50160

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne: 20. dubna 2018

  
Jindřich Coufal

## Poděkování

„Na tomto místě bych velice rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D., za velmi cenné rady, připomínky a odbornou pomoc na konzultacích při řešení mé diplomové práce. Také výzkumné infrastruktury Centra ENET, díky které tato práce vznikla.“

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je navrhnout algoritmus pro optimalizaci kvality elektrické energie v ostrovním napájecím systému. Dodávka elektrické energie do této sítě pochází z obnovitelných zdrojů elektrické energie využívající sluneční záření. Off-Grid napájecí systém má také možnost akumulace přebytků elektrické energie pro následné pokrytí spotřeby v době, kdy nestačí aktuální dopad úhrnu slunečního svitu na fotovoltaické panely. Předmětem návrhu algoritmu je určit relevance spotřebičů, které ovlivní posouvání spotřeby v čase takovým způsobem, aby velikosti kvalitativních parametrů elektrické energie byly dodrženy dle stanovených limitů aktuální legislativy. Koncepce pro zajištění správné kvality elektrické energie neřeší důsledek negativních zpětných vlivů, ale poprvé jejich příčinu. Posouvání spotřeby je optimalizační prvek v algoritmu, který využívá prediktivních nástrojů, jež mohou do budoucna tvořit základy umělé inteligence nebo tzv. chytrých sítí. Vytvořený koncept algoritmu může sloužit jako podklad pro realizaci aktivního řízení energií 2.0, který momentálně řeší pouze energetickou soběstačnost. Implementace nové části algoritmu si klade za cíl řešit energetickou spolehlivost při řízení energií v testovací platformě Off-Gridu, jež je vybudován v areálu VŠB-TUO.

## **Klíčová slova**

Ostrovní systémy, parametry kvality elektrické energie, fotovoltaické systémy, obnovitelné zdroje elektrické energie, algoritmus, zátěž, optimalizace, kategorizace spotřebičů

## **Abstract**

The goal of this master thesis is a concept of algorithm for power quality optimization in an Off-Grid system. Researched network is fed from renewable source using solar energy with the ability to accumulate the excess of electric power to use it during the parts of the day, when the contribution of the total sunlight is not sufficient. The aim of this algorithm is how to determinate the relevancy of loads for proper operation of load shifting, which works for compliance standard's limits of power quality. Load shifting concept for regular power quality is solving the consequences of the problems not the actual cause of them. It is an optimization element in algorithm, which is using predictive tools. These tools can become a basic ground for the creation of artificial intelligence or smart grids. The designed concept of algorithm can be used as the basis for the realization of active energy management 2.0. This management system currently deals only with energy self-sufficiency. The implementation of the new part in algorithm aims to solve the energy reliability management in the Off-Grid test platform, which has been built in campus of VŠB-TUO.

## **Key words**

Off-Grid systems, parameters of power quality, photovoltaic systems, renewable energy sources, algorithm, load, optimization, categorization of appliances

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 1 -
Seznam použitých zkratk.....	- 2 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 4 -
Úvod.....	- 6 -
1 Kvalita elektrické energie.....	- 7 -
1.1 Parametry kvality elektrické energie a jejich vizualizace .....	- 7 -
1.2 Zpětné vlivy na síť .....	- 18 -
1.3 Možnosti eliminace zpětných vlivů a optimalizačních opatření .....	- 21 -
2 Testovací platforma Off-Grid systému.....	- 26 -
2.1 Vybudovaná platforma v budově těžkých laboratoří VŠB-TUO .....	- 27 -
2.2 Měření kvality elektrické energie.....	- 35 -
2.3 Analýzy kvality elektrické energie.....	- 38 -
3 Kategorizace spotřebičů .....	- 45 -
3.1 Přehled spotřebičů v napájecím systému .....	- 45 -
3.2 Simulace spotřeby (RŘS).....	- 49 -
3.3 Kategorizování spotřebičů .....	- 49 -
4 Koncepce algoritmu pro optimalizaci PQ v Off-Grid systému .....	- 51 -
4.1 Vývojové diagramy pro stanovení limitů kvality elektrické energie .....	- 52 -
4.2 Prediktivní nástroje .....	- 55 -
4.3 Implementace výsledného algoritmu pro optimalizaci PQ .....	- 56 -
Závěr .....	- 58 -
Použitá literatura .....	- 60 -
Seznam příloh.....	- 63 -

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\Delta f$	%	Odchylka od jmenovité frekvence
$f$	Hz	Frekvence
$t$	s	Čas
$P$	W	Činný výkon
$P_I$	W	Příkon
$P_{It}$	-	Dlouhodobá míra vjemu flikru
$P_{max}$	W	Maximální výkon ostrovního měniče
$P_{st}$	-	Krátkodobá míra vjemu flikru
$S$	V·A	Zdánlivý výkon
THD	-	Celkové harmonické zkreslení
THD <sub>i</sub>	-	Celkové harmonické zkreslení proudu
THD <sub>u</sub>	-	Celkové harmonické zkreslení napětí
$\Delta U$	%	Odchylka od jmenovitého napětí, změna napětí
$U$	V	Elektrické napětí
$U_{harm}$	%	Harmonické napětí
$U_n$	V	Jmenovité elektrické napětí

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
AC	Střídavý proud a napětí
ADSM	Systém aktivního řízení (Active Demand Side Management)
BAT	Akumulační zařízení, baterie
ČR	Česká republika
DAQ	Sběr dat (Data Acquisition)
DC	Stejnoseměrný proud a napětí
DP	Diplomová práce
DS	Distribuční síť
EOP	Elektrická oblouková pec
FV	Fotovoltaický panel
FVE	Fotovoltaická elektrárna
G	Generátor
HDO	Hromadné dálkové ovládání
MS	Microsoft
MTP	Měřicí transformátor proudu
MTU	Měřicí transformátor napětí
Ni-Cd	Nikl-kadmiový
nn	Nízké napětí
OS	Ostrovní systém
OM	Ostrovní měnič
OZE	Obnovitelný/é zdroj(e) energie
LPS	Systém ochrany před bleskem (Lightning protection system)
PLC	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PPQ	Parametry kvality elektrické energie (Parameters of Power Quality)
PQ	Kvalita elektrické energie (Power Quality)
PQA	Analyzátor kvality elektrické energie (Power Quality Analyzer)
PSU	Napájecí zdroj (Power Supply Unit)

## Seznam použitých zkratk

---

R	Rozvaděč
R1	Rozvaděč silnoprůdu (On-Grid)
R-Bat	Rozvaděč pro akumulaci elektrické energie
REM1	Sdružený rozvaděč Off-Gridu (ADSM+PQA+DAQ+Adaptivní chránění)
RMS	Efektivní hodnota (Root Mean Square)
RN	Regulátor nabíjení (MPPT)
RŘZ	Rozvaděč řízení zátěže, rozvaděč pro simulování spotřeby
ŘJ	Řídicí jednotka
SCADA	Dispečerské řízení a sběr dat (Supervisory Control And DAq)
SSR	Polovodičové relé (Solid-State Relay)
SQL	Strukturovaný dotazovací jazyk pro databáze (Structured Query Language)
SW	Software
TR	Transformátor (napět'ový měnič)
USM	Usměrnění, usměrňovač
VTE	Větrná elektrárna
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
WBP	Přepět'ová ochrana (Wind Boy Protection)

---



## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
obr. 1	<i>Schéma přenosové soustavy ČR</i>	- 8 -
obr. 2	<i>Pracoviště HARD VŠB-TUO</i>	- 8 -
obr. 3	<i>Vymezení limitních hodnot frekvence v On-Grid síti</i>	- 10 -
obr. 4	<i>Vymezení limitních hodnot frekvence v Off-Grid síti</i>	- 11 -
obr. 5	<i>Vizualizace limitních hodnot frekvence v Off-Grid síti</i>	- 12 -
obr. 6	<i>Vizualizace limitních hodnot napájecího napětí v síti</i>	- 13 -
obr. 7	<i>Vizualizace krátkodobého vjemu blikání <math>P_{st}</math></i>	- 14 -
obr. 8	<i>Vizualizace limitních hodnot dlouhodobého vjemu blikání <math>P_{lt}</math></i>	- 14 -
obr. 9	<i>Vizualizace limitních hodnot činitele harmonického zkreslení napětí</i>	- 16 -
obr. 10	<i>Úrovně napětí na kmítočtech signálů v procentech <math>U_n</math> ve veřejných DS nn</i>	- 17 -
obr. 11	<i>V-A charakteristiky obvodů</i>	- 19 -
obr. 12	<i>Příklad harmonické analýzy proudu odebíraného regulovaným pohonem</i>	- 20 -
obr. 13	<i>Trojrozměrný graf výkonů</i>	- 20 -
obr. 14	<i>Zjednodušené blokové schéma Off-Grid systému, AC vs. DC topologie.</i>	- 24 -
obr. 15	<i>Princip posunování spotřeby</i>	- 25 -
obr. 16	<i>Koncepce vývoje autonomního Smart-Grid systému na VŠB-TUO</i>	- 27 -
obr. 17	<i>Jednotlivé zdroje a výkonová elektronika použitá v testovací platformě Off-Grid</i>	- 28 -
obr. 18	<i>Aktuální zjednodušené blokové schéma OS (DC topologie) s využitím pouze FVE</i>	- 29 -
obr. 19	<i>Blokové schéma aktivní energetické jednotky Off-Grid systému</i>	- 30 -
obr. 20	<i>Řídící část ADSM na Hardu</i>	- 30 -
obr. 21	<i>Záznamový monitorovací SW</i>	- 31 -
obr. 22	<i>Pracoviště na Hardu</i>	- 33 -
obr. 23	<i>Webová prezentace stavu energetické bilance rodinného domu s využitím ADSM</i>	- 34 -
obr. 24	<i>Přehled rozhraní Quido pro manuální spínání jednotlivých spotřebičů</i>	- 34 -
obr. 25	<i>Rozhraní Conext ComBox pro sledování stavu Off-Gridu</i>	- 35 -
obr. 26	<i>Přenosný analyzátor sítě ENA 300</i>	- 36 -
obr. 27	<i>Ukázka rozhraní BK-Report</i>	- 36 -
obr. 28	<i>Analyzátor SMC 144 a) Obecné schéma zapojení</i>	- 37 -
obr. 29	<i>Rozhraní ENVIS pro sledování stavu PQ z SMC 144</i>	- 38 -
obr. 30	<i>Ukázka z vyhodnocování fluktuace frekvence na pracovišti Hard</i>	- 39 -
obr. 31	<i>Ukázka z vyhodnocování kolísání napětí na pracovišti Hard</i>	- 40 -
obr. 32	<i>Charakteristika frekvence vzhledem k zatížení ostrovního měniče</i>	- 41 -
obr. 33	<i>Charakteristika napětí vzhledem k zatížení ostrovního měniče</i>	- 41 -
obr. 34	<i>Ukázka z vyhodnocování THD na pracovišti Hard v závislosti na čase</i>	- 42 -
obr. 35	<i>Vyhodnocení THD na pracovišti Hard v závislosti na zatížení ostrovního měniče</i>	- 42 -
obr. 36	<i>Ukázka z vyhodnocování míry flikru na pracovišti Hard v závislosti na čase</i>	- 43 -
obr. 37	<i>Princip korelační analýzy</i>	- 44 -
obr. 38	<i>Reálná korelační analýza mezi meteorologickými a PPQ</i>	- 44 -
obr. 39	<i>Ukázka z měření: sepnutí mikrovlnky – osciloskop Tektronix TDS 2014C</i>	- 45 -
obr. 40	<i>Ukázka z měření – průběh napětí a proudu při připojení</i>	- 46 -
obr. 41	<i>Ukázka z měření: sepnutí mikrovlnky – ENVIS</i>	- 47 -

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

obr. 42	Ukázka z měření: sepnutí mikrovlnky – Conext ComBox	- 48 -
obr. 43	Skladba spotřebičů v testovací platformě	- 48 -
obr. 44	Grafické určení relevancí v návaznosti na posouvání spotřeby	- 50 -
obr. 45	Obecný přehled funkce algoritmu pro optimalizaci sítě	- 51 -
obr. 46	Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace PPQ mimo normou stanovenou mez	- 52 -
obr. 47	Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při fluktuaci frekvence	- 53 -
obr. 48	Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při kolísání napětí	- 53 -
obr. 49	Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při s dlouhodobé míře flikru	- 54 -
obr. 50	Zjednodušený algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při THDu	- 54 -
obr. 51	Srovnání predikovaných a naměřených hodnot pro úhrn slunečního svitu	- 55 -
obr. 52	Obecné schéma optimalizačního cyklu pro PPQ s využitím prediktivních nástrojů	- 56 -
obr. 53	Orientační bloky implementovaného algoritmu pro optimalizaci PQ	- 57 -
obr. 54	Funkce ADSM pro energeticky soběstačný Off-Grid 21.3.2018	- 57 -

Tabulka	Název tabulky	Číslo stránky
tab. 1	Relativní i absolutní odchylky kmitočtu On-Grid vs. Off-Grid sítě při $f_N = 50$ Hz	- 10 -
tab. 2	Relativní i absolutní odchylky napětí sítě při $U_n = 230$ V	- 12 -
tab. 3	Úrovně jednotlivých $U_{harm}$ v předávacím místě v procentech $U_n$ až do 25. řádu	- 17 -
tab. 4	Parametry kvality elektrické energie On-Grid vs. Off-Grid napájecího systému	- 18 -
tab. 5	Přehled hlavních jevů ovlivňujících kvalitu dodávané elektrické energie	- 22 -
tab. 6	Kategorizace spotřebičů v testovací platformě Off-Gridu	- 49 -

# Úvod

V současnosti má přímý dopad na vývoj energetiky ve státě legislativa Evropské Unie a politika České republiky. Nyní je trendem rozvíjet obnovitelné zdroje elektrické energie do decentralizovaných malých autonomních elektráren. V minulosti již byly vybudovány napájecí systémy, které pro svoji dodávku elektrické energie využívaly zdroje ze slunečního svitu, větru, jejich kombinace nebo jiný tzv. obnovitelný zdroj elektrické energie. Obnovitelnými zdroji se rozumí přeměna elektrické energie ze zdrojů, které jsou z hlediska délky lidského života nevyčerpatelné. Tyto napájecí systémy mohou fungovat bez připojení na distribuční síť v ostrovním režimu, a proto jsou označovány také jako Off-Gridy. Po připojení Off-Gridů do aktivní distribuční sítě, mohou svým disponibilním výkonem přispět k celkové bezpečnosti a stabilitě v síti. A to zejména ve špičkových stavech, které obvykle nastávají ve stejnou dobu. Předvídatelné situace, jež se často opakují, vedou k rozvoji řízení energií v napájecích systémech s využitím prediktivních nástrojů. Ty využívají rozsáhlé databáze, ze kterých se mohou zdokonalovat, což může vést k postupnému vývoji umělé inteligence pro řízení energií i v běžných domácnostech, jež budou připojeny do tzv. chytré sítě. Databázové systémy vyžadují nepřetržitý monitoring relevantních dat, aby mohly být následně vyhodnoceny a uchovány pro další využití prediktorů nebo analýz sítě.

Řízení toků energií musí zabezpečit dostatek množství energie, a to v požadované kvalitě. Znamená to, že síť musí být energeticky soběstačná, a zároveň energeticky spolehlivá. Narušení kvalitativních poměrů vzešlo právě s nástupem různých typů zdrojů elektrické energie do sítě, a to zejména těch obnovitelných. Je to způsobeno rozdílným zkratovým výkonem těchto napájecích systémů. Dále jejich stochastickou dodávkou elektrické energie, jež je závislá na aktuálním počasí, může způsobovat problémy spojené energetickou soběstačností, spolehlivostí nebo plánem akumulace elektrické energie. Zapojení obnovitelných zdrojů do aktivní distribuční sítě může přinášet vzájemné interference, které mohou parametry kvality elektrické energie také negativně ovlivnit. Pro správnou životnost, chod a funkci zařízení nebo spotřebičů musí být dodržovány kvalitativní limity, kterými se zabývají mezinárodní normativní organizace. Mezi ty dobře známé patří IEC (Int. Electrotechnical Commission) a IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). V legislativní oblasti Off-Gridů stále nejsou definovány všechny parametry kvality elektrické energie. Některé limity kvalitativních parametrů také definují kodexy nebo pravidla napojení do rozvodné soustavy, avšak dominantní je v téhle oblasti stále norma ČSN EN 50 160.

Na akademické půdě Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava je vybudovaná testovací platforma Off-Gridu, která reprezentuje rodinný dům s využitím obnovitelných zdrojů elektrické energie. Napájecí systém má také zaimplementované aktivní řízení spotřeby s využitím prediktivních nástrojů, které obsahují i rozsáhlou databázi relevantních dat. V minulosti bylo provedeno několik analýz, které se týkaly mj. i kvality elektrické energie. Nyní je možnost pracovat na konceptu aktivního řízení toků energií v testovací platformě Off-Gridu dál, neboť systém řízení energií nemá optimalizaci na energeticky spolehlivý provoz, který spadá do oblasti kvality elektrické energie. K takovým optimalizacím může dopomoci i rovnoměrné rozložení zátěže v napájecím systému takovým způsobem, aby se eliminovaly tzv. špičkové stavy sítě, které jsou dnes běžnou praxí. K rovnoměrnému rozložení zátěže mohou dopomoci rovněž napájecí systémy s využitím akumulace elektrické energie. Cílem této diplomové práce je navrhnout optimalizační algoritmus kvality elektrické energie pro reálně vybudovaný Off-Grid na pracovišti, které se označuje také jako Hard.

# 1 Kvalita elektrické energie

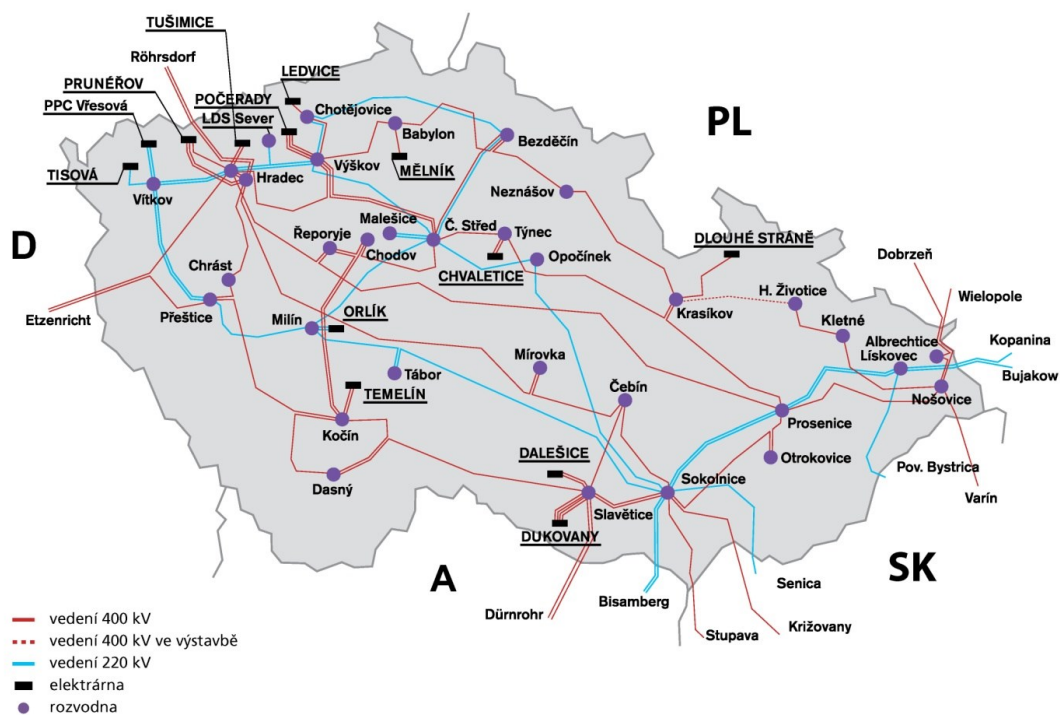
Kvalita elektrické energie má definované limity, kterými se zabývají mezinárodní technické normativní organizace. Jsou to především kodexy, normy, pravidla, či podmínky pro provozování přenosových soustav distributorů, jež definují parametry kvality elektrické energie (PPQ). Definují také přesně jejich limity překročení po dovolenou dobu. Tyto PPQ musejí být ve standardizovaných limitech dodržovány, neboť zařízení nebo spotřebiče jsou navrženy pro správnou funkčnost právě s ohledem na napájecí systém a jeho elektrickými parametry. Pro Off-Gridy jsou kvalitativní limity částečně odlišné. Navíc je zmiňuje legislativa pouze omezeně. Dominantní legislativní předpis, který zahrnuje kvalitu elektrické energie je zatím stále převzatá evropská norma ČSN EN 50160 ed. 3. Následující kapitoly probírají parametry kvality elektrické energie podle výše zmiňované normy s doplněním návrhu interpretace PPQ v grafické podobě. Dalšími legislativními předpisy, které se zabývají kvalitativními limity jsou PPDS – příloha 4, norma o Elektromagnetické kompatibilitě ČSN EN 61000-4-30, části podnikových norem energetiky PNE 33 3430-(0-7) a další mezinárodní standardy jako UIE-IEC, které řeší např. ČSN EN 61000-4-15. Tyto legislativní předpisy však obsahuje ve stručnosti z hlediska parametrů kvality elektrické energie a jejich velikostí také ČSN EN 50160 ed. 3. Off-Gridy jsou zde až v posledních letech, a proto většina PPQ je pro tento napájecí systém nedefinována. Mezi možnostmi, jak nahlížet na problematiku nedefinovaných parametrů kvality elektrické energie, je i přejímat velikosti limitů od synchronně napojených systémů ve stejných mezích. [1]

## 1.1 Parametry kvality elektrické energie a jejich vizualizace

Kvalitativní popis napájecího napětí se obecně týká charakteristiky kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie třířázových napětí. V této DP jsou PPQ probírány pouze pro nízké napětí, neboť parametry vysokonapěťových charakteristik nijak nesouvisí s následujícím tématem testovací platformy Off-Gridu. Se zvyšujícím trendem narůstajících dat nastává také otázka správné interpretace a analyzování změřených veličin, a proto jsou v následujících podkapitolách probírány vizualizace limitů parametrů kvality elektrické energie v podobě grafů s fiktivnímu daty. Závěrem každé podkapitoly je tedy přehledným graf, který přehledně vystihuje, zda jsou limity PQ překročeny, či nikoliv. Následně bude tato grafická interpretace PQ použita v jiných částech DP.

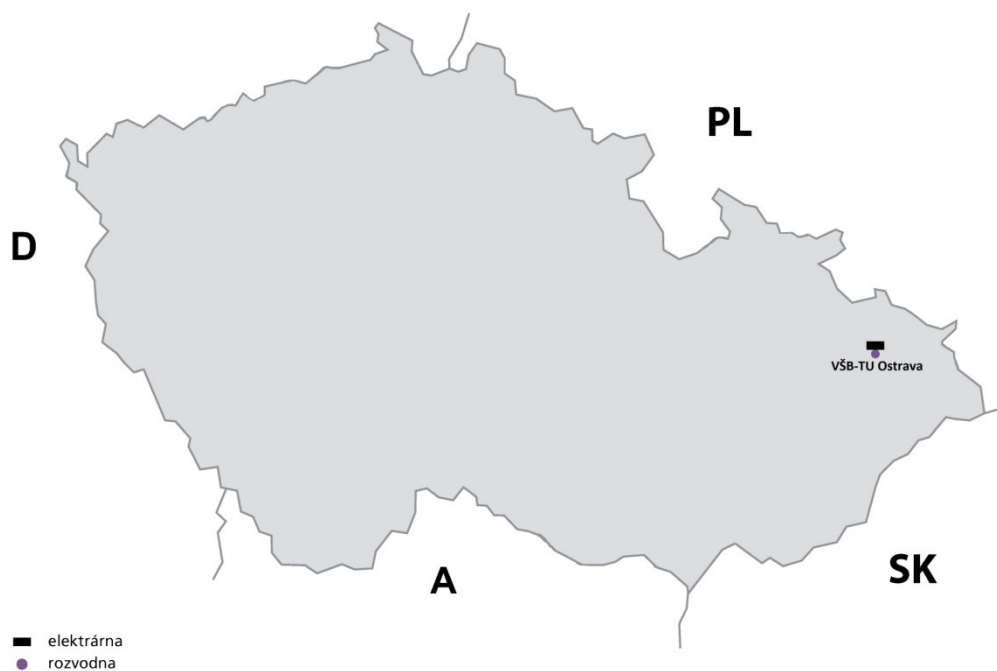
U systému On-Grid jsou limitní hodnoty přísnější, neboť se jedná o rozsáhlý propojený systém, který funguje v synchronním režimu. V zásadě jde o systém, kde jsou centra přeměny el. energie rozmístěny na různých místech a el. energie je poté přenášena i do vzdálených míst viz obr. 1. Poté je el. energie přeměněna na velikosti parametrů, kterou mohou již využívat běžní spotřebitelé nebo např. výrobní závody. Ti stále ve větší míře připojují citlivá zařízení, spotřebiče, či technologie. Zejména ty mohou být citlivé na změny napětí nebo kolísání frekvence. Ostatní PPQ vycházejí dominantně právě z těchto třech el. veličin. Typický Off-Grid má centrum přeměny el. energie velmi blízko svých zařízení, spotřebičů nebo technologií a není součástí většího celku energetického systému. V některých případech jde také o aplikaci v odlehlých lokalitách, kde by bylo nevhodné vybudovat přípojku do On-Grid sítě. Jedná se tak zpravidla o síť s několikanásobně nižším zkratovým výkonem, a jsou tedy i náchylnější na změnu zatížení, což je jeden z důvodů, proč mají Off-Grid sítě částečně snížené požadavky na kvalitu elektrické energie.

Schéma sítě 400 a 220 kV



obr. 1 Schéma přenosové soustavy ČR [2]

Off-Grid napájecí systém



obr. 2 Pracoviště HARD VŠB-TUO [2]  
(příklad jednoho z mnoha Off-Grid napájecích systémů)

Překročení parametrů PQ se nerozumí pouze překročit limitní mez některé z elektrických veličin, ale také je kladen důraz na časové období nebo interval tohoto překročení, a proto je v následujících kapitolách podrobněji rozebráno i toto téma.

Další problematikou je sběr dat parametrů PQ. U měření frekvence je to střední hodnota základní harmonické v 10 sekundách, zatímco u napětí, a veličin z něj vycházejících, je to střední hodnota základní harmonické v 10 minutách. V praxi to znamená, že v síti může nastat krátkodobé překročení kvalitativního parametru mnohonásobně vyšší hodnoty, než udává norma. Právě zprůměrováním této hodnoty s ostatními v daném časovém intervalu se může výsledná hodnota určená k vyhodnocení podle ČSN EN 50160 ed. 3 jevit jako naprosto správná, načež i podle norem, kodexů nebo pravidel o paralelním chodu sítí je, protože se jedná o pravidla zvolené měřicí metody.

Parametry kvality elektrické energie se pro oblast NN liší dle napojení systému. Systémy jsou nejčastěji připojeny přímo na DS. Takový systém označován jako On-Grid a v legislativě se vyskytuje jako synchronně napojený napájecí systém. Napájecí soustava má zpravidla více napojených spotřebitelů elektrické energie. Její zkratový výkon je značně větší, než u Off-Grid napájecích systému a pohybuje se řádově ve  $10^5 \text{ V} \cdot \text{A}$  a více. Prakticky znamená více spotřebitelů také různorodější skladbu spotřebičů, které vyžadují stálost dodávky elektrické energie a její kvalitu v mnohem větší míře, než je tomu u systémů v Off-Grid režimu. Řeší se zde tedy určitá kompatibilita připojených spotřebičů, zejména pak u výpočetní techniky, spotřebičů se zabudovanou elektronikou a jiných dnes už běžně používaných spotřebičů v domácnostech, které bývají zpravidla frekvenčně a napěťově závislé. Kvalita elektrické energie může být také vysvětlována jako určitá kondice spotřebované elektrické energie, jež využívají připojené spotřebiče a zařízení. Kvalitní výkon umožňuje pracovat spotřebičům a zařízením s jejich zamýšleným výkonem. Pakliže se hodnoty odchylek kvality elektrické energie pohybují v překročených mezích nebo četnostech, může dojít k neočekávaným výkonovým ztrátám nebo i snížení celkové životnosti elektrického spotřebiče. [1]

Kvalitativní parametry Off-Grid napájecího systému nejsou v současné době přesně specifikovány kromě fluktuace napájecí frekvence. Takové opatření vzešlo kvůli skladbě spotřebičů, které můžeme v Off-Grid napájecí soustavě snáze ovlivnit, než u On-Gridu. Vezměme v potaz běžnou skromnou domácnost, ve které se využívá elektrická energie pro běžné spotřebiče s nízkým zastoupením elektronických zařízení. Tedy domácnost, jež má skladbu spotřebičů uspořádanou tak, že je téměř frekvenčně nezávislá nebo je jejich limit fluktuace kmitočtu větší než u dnešní moderní elektroniky, která může být zastoupena v technologiích, jež jsou např. ve výrobním závodu. V takovém případě je myšlenka výstavby Off-Grid napájecího systému v pořádku. Stochastické fluktuování parametrů elektrické energie je způsobeno využíváním dnešních OZE, které jsou závislé na aktuálních meteorologických podmínkách. Kvalitu elektrické energie lze však také ovlivnit volbou topologie Off-Gridu, což je podrobněji probíráno v kap. 1.3.2.1. [1]

Pro pochopení, analyzování nebo vyhodnocování chování sítí je nutné uvažovat, že většina měřicích přístrojů PQ, které respektují EN 50160 vycházejí z průměrovaných hodnot. Také je nutné uvažovat přesnosti měřicích přístrojů, a to teoreticky i přesnost časového údaje, který se může pohybovat např. s přesností  $\pm 15$  sekund za týden, což může vyvolat zpoždění nebo předstih o přibližně 13 minut za rok. Při dlouhodobých měření může tedy i tato nepřesnost rozhodnout o výsledku vyhodnocení PQ. Avšak z praktického hlediska je tato skutečnost nepravděpodobná, protože měřicí přístroje procházejí po určité době k rekalibraci nebo celkové výměně přístroje za novější typ.

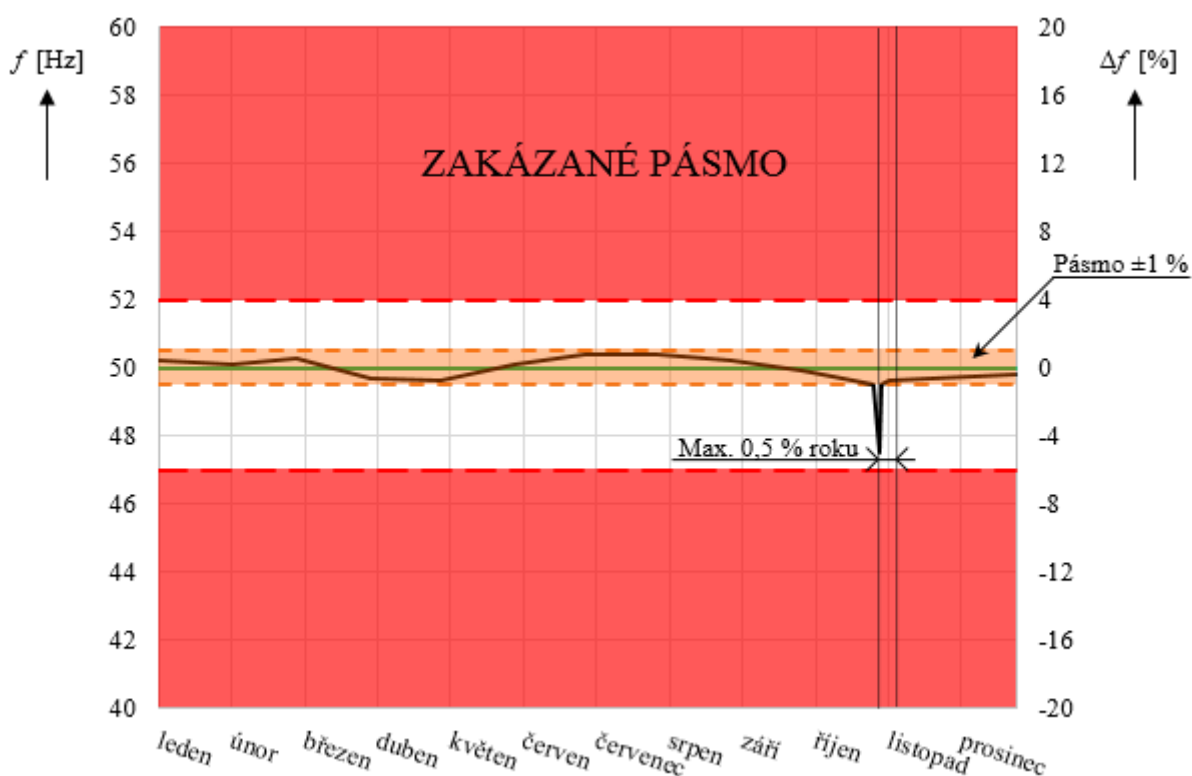
## 1.1.1 Kmitočet sítě

Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota frekvence základní harmonické měřená v intervalu deseti sekund. Jmenovitá frekvence napájecího elektrického napětí je 50 Hz.

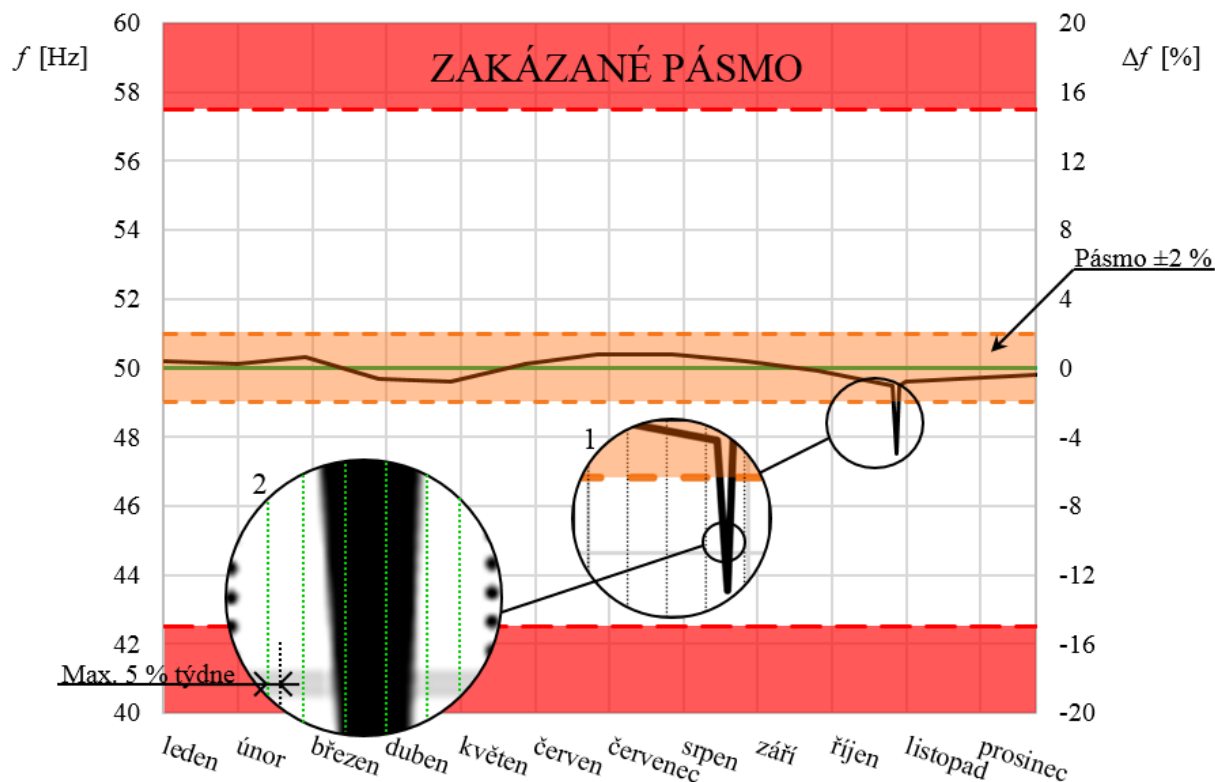
V klasické distribuční síti se je povolen limit odchylky o 1 %, což činí při jmenovité napájecí frekvenci 50 Hz přesně 0,5 Hz. Hodnoty mezi 49,5-50,5 Hz jsou tedy považovány za přípustné, ačkoli může nastat fluktuace kmitočtu mezi 47-52 Hz na přibližně necelé dva dny. Legislativa dále nespecifikuje, zdali má jít o roční měření s počátkem prvního kalendářního měsíce nebo musí být časový interval mezi odchylkami kmitočtu sítě více než  $\pm 1$  % od okamžiku začátku nebo konce vychýlení hodnoty frekvence. To znamená, že každý libovolný analyzovaný časový interval musí splňovat max. předepsané limity. V případě Off-Gridů jsou dovolené velikosti fluktuací napájecího kmitočtu dvojnásobné. Hodnoty frekvence přes 1 Hz jsou dovoleny v časovém období necelé 8,5 h v každém týdnu, přičemž se musí pohybovat mezi velikostmi 42,5-57,5 Hz, což odpovídá max. přípustné odchylce  $\pm 15$  %. Hodnoty mimo tyto limity se nacházejí v zakázaném pásmu, neboť nesplňují kvalitativní limity el. energie podle ČSN EN 50 160 ed.3, ze které vycházejí i jiné normy klasifikující PQ.

**tab. 1** Relativní i absolutní odchylky kmitočtu On-Grid vs. Off-Grid sítě při  $f_N = 50$  Hz

<b>On-Grid</b>	$\pm 1$ %	49,5÷50,5 Hz	99,5 % roku
	+4 % / -6 %	47÷52 Hz	100 % času
<b>Off-Grid</b>	$\pm 2$ %	49÷51 Hz	95 % týdne
	$\pm 15$ %	42,5÷57,5 Hz	100 % času



obr. 3 Vymezení limitních hodnot frekvence v On-Grid síti podle ČSN EN 50 160 ed.3 v ročním diagramu (zeleně - 50 Hz, černě – načrtnutý průběh f)

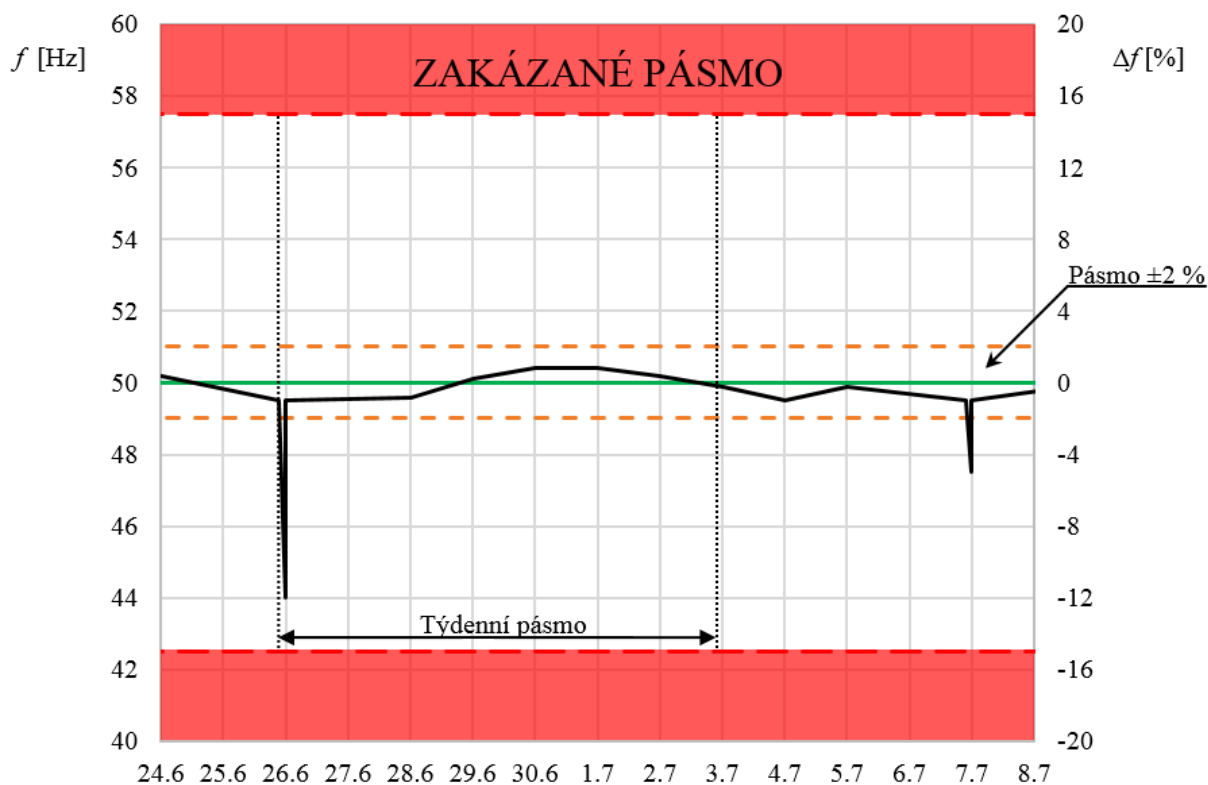


obr. 4 Vymezení limitních hodnot frekvence v Off-Grid síti podle ČSN EN 50160 ed.3 v ročním diagramu (zeleně - 50 Hz, černě – načrtnutý průběh  $f$ , 1 - část měsíčního diagramu, 2 - část týdenního diagramu)

Obr. 3 a 4 znázorňují důležitost časového záznamu. Stejný průběh fluktuace frekvence pro On-Grid a Off-Grid síť v rámci jednoho roku nemusí nevyhovovat z hlediska kvality elektrické energie podle ČSN EN 50160 ed.3 pro Off-Grid, i když jsou v případě Off-Gridů dovolené velikosti fluktuací napájecího kmitočtu až dvojnásobné hodnoty oproti sítím On-Grid. Jejich délka trvání však nemůže být tak dlouhá jako v případě On-Grid sítí. Je to způsobeno rozdílnou definicí délky trvání odchylky frekvence od nominální hodnoty. V případě On-Grid sítí je určena rokem, zatímco u Off-Grid sítí je určena týdnem. To může také způsobit, že v celkovém časovém úhrnu fluktuace kmitočtu dojde v rámci roku k delšímu trvání vychýlení, avšak stále musí být dodržena doba trvání 5% intervalu z týdne. Dovolené limity v Off-Grid sítích jsou tedy z hlediska četnosti benevolentnější, vychýlení od nominální hodnoty frekvence je dovoleno také ve větší míře, než je tomu u On-Grid sítí, ale jejich délka trvání není dovolena natolik jako u On-Grid sítí.

Vizualizace pro Off-Grid síť je naznačena na obr. 5. Jedná se o dvoutýdenní měřicí okno s vymezením hodnot frekvence  $\pm 20\%$ . Po vychýlení frekvence přes pásmo  $\pm 2\%$  začne i sledování času, konkrétně jednoho týdne, kdy je dovoleno překročit frekvenci v rozmezí  $\pm 15\%$  v úhrnném období 5 % z týdne, což činí přesně 8 hodin a 24 minut. Na obr. 5 jsou načrtnuty dvě fluktuace s totožnou časovou odezvou 2 hodin a 24 minut. Rezerva pro další odchylky v rozmezí od  $\pm 2\%$  do  $\pm 15\%$  je tedy ještě 6 hodin, a to v obou případech.





obr. 5 Vizualizace limitních hodnot frekvence v Off-Grid síti podle ČSN EN 50 160 ed.3 ve dvoutýdenním diagramu (zeleně - 50 Hz, černě - načrtnutý průběh  $f$ )

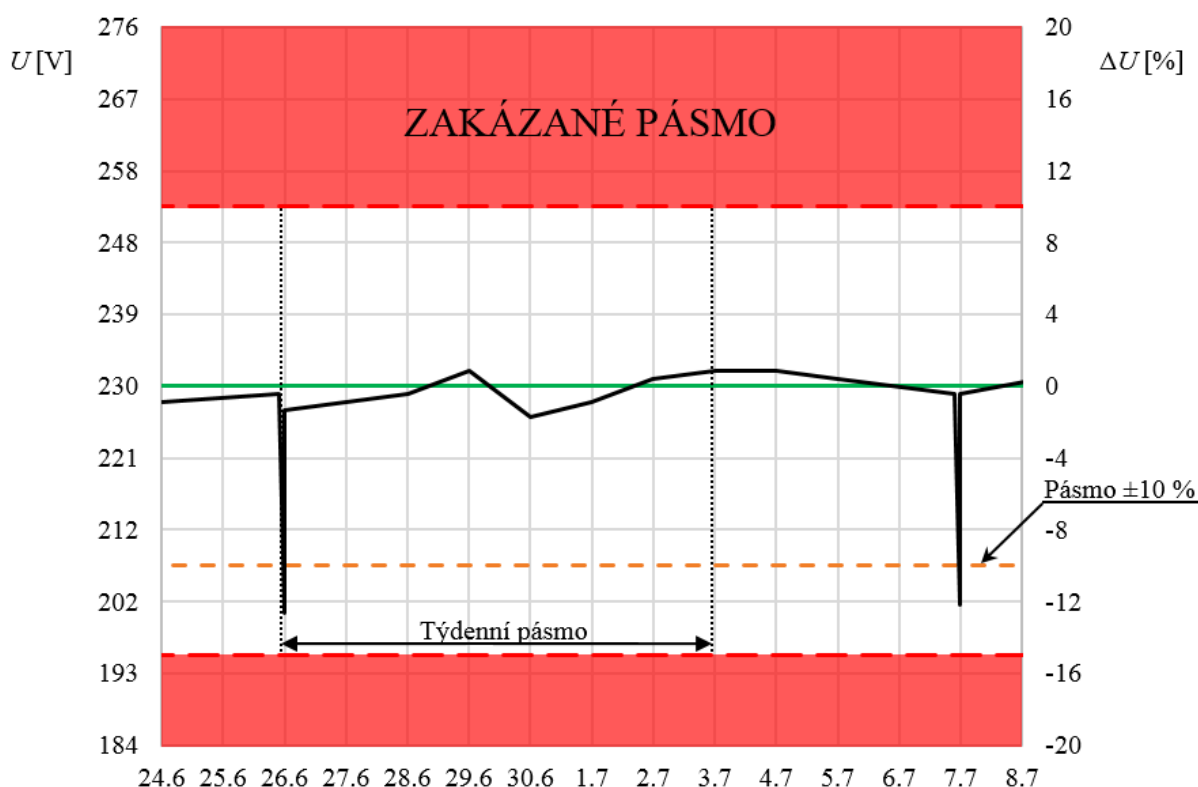
### 1.1.2 Velikost a odchylky napájecího napětí

Mezi fázovým a středním vodičem je normalizovaná velikost jmenovitého napětí v rámci DS nízkého napětí se čtyř-vodičovým zapojením  $U_n = 230$  V. Pro troj-vodičové třífázové soustavy je stanovena totožná velikost, avšak platí mezi fázovými vodiči. S vyloučením přerušení napájení, tedy za normálních provozních podmínek, musí být během každého týdne 95 % průměrných RMS hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_n \pm 10$  %. Všechny průměrné RMS hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu  $U_n + 10$  % / - 15 %. V oblastech s dlouhým vedením může být rozsah i mimo stanovené limity, avšak odběratelé by o tom měli být informováni. [3]

Limitní velikosti kolísání od jmenovitého napětí sítě jsou tedy také definovány pro týdenní interval, přičemž není rozlišováno, zdali se jedná o Off-Grid síť, či síť On-Grid. Pokud odchylka od jmenovitého napětí trvá do celkového časového rozmezí 8 hodin a 24 minut z libovolného vybraného týdne v rozmezí pod -10 % do -15 %, jsou také splněny kvalitativní požadavky z hlediska norem, kodexů nebo pravidel o paralelním chodu sítě. [1]

tab. 2 Relativní i absolutní odchylky napětí sítě při  $U_n = 230$  V

On-Grid / Off-Grid	$\pm 10$ %	207÷253 V	95 % týdne
	+10 % / -15 %	195,5÷253 V	100 % času



obr. 6 Vizualizace limitních hodnot napájecího napětí v síti podle ČSN EN 50 160 ed.3 ve dvoutýdenním diagramu (zeleně - 230 V, černě – načrtnutý průběh U)

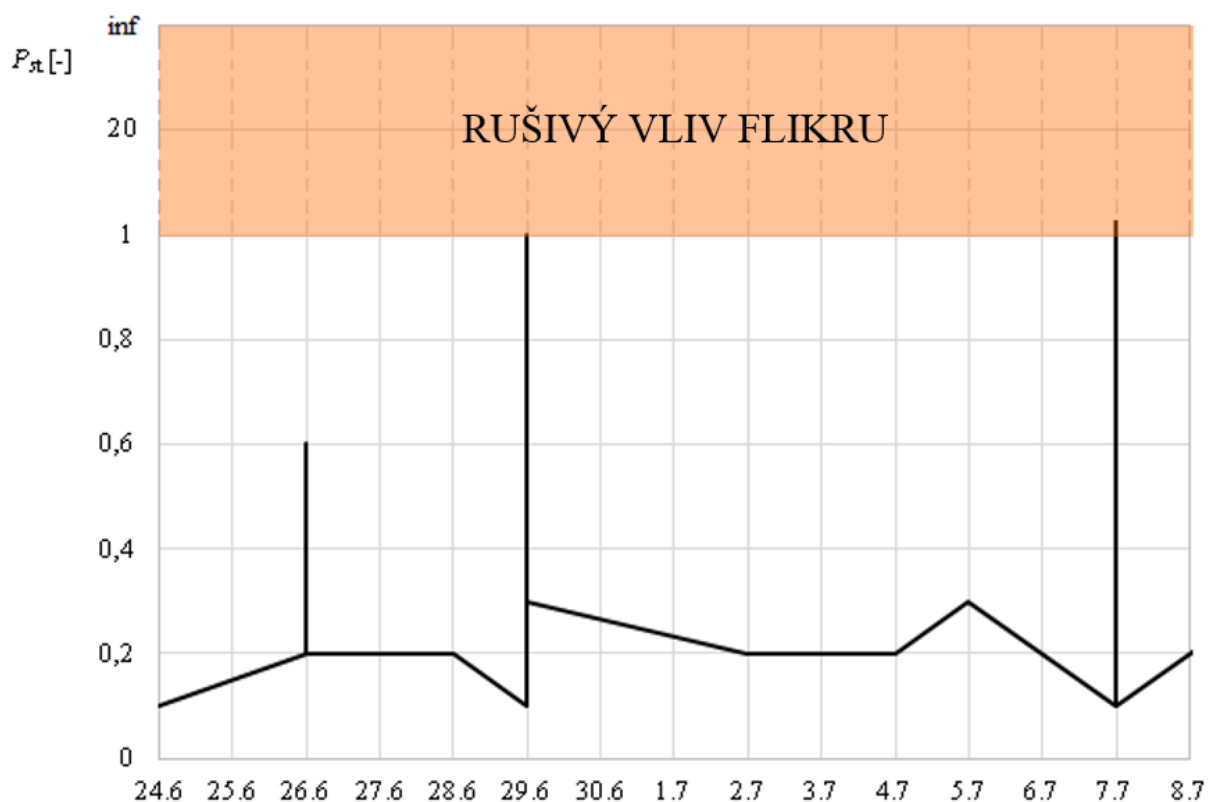
### 1.1.3 Rychlé změny napájecího napětí – flikr

Intenzivní fluktuaci napětí charakterizuje dominantní parametr kvality elektrické energie, který je označován jako flikr. Časová změna impedance je příčinou kolísání napětí, která vyvolává vjem, jež pocítí i běžný odběratel, neboť rychlé změny napětí se projevují rušivě zejména u světelných zdrojů. Míra vjemu blikání je součástí kvalitativních parametrů el. energie a je také klasifikován jako subjektivní záležitost. [1]

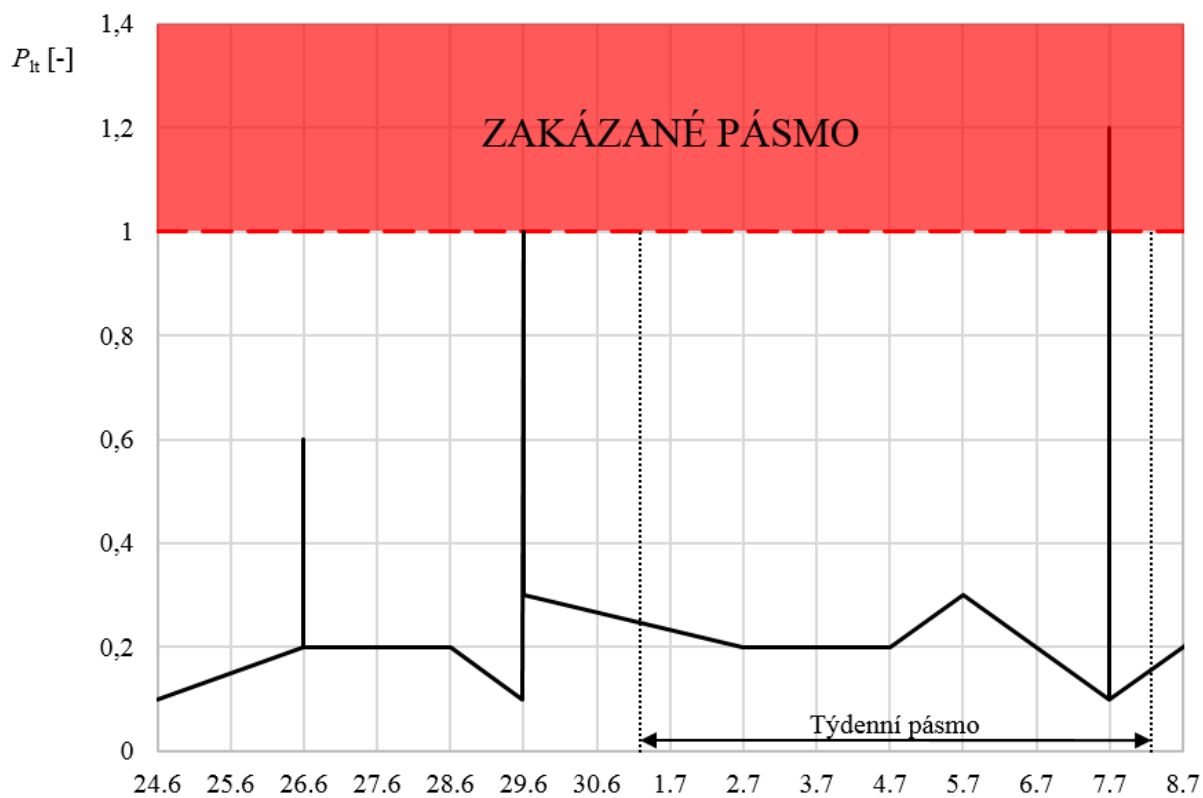
Měřicí metoda flikru je popsána v mezinárodní legislativě UIE-IEC a její vyhodnocení se provádí veličinami  $P_{st}$  a  $P_{lt}$ . Intenzita nepříjemnosti flikru je popsána krátkodobou mírou vjemu blikání, a ta je měřena po dobu 10 minut. Její limit není v rámci normy ČSN EN 50 160 ed. 3 definován, a proto je na obr. 7 zvýrazněna tzv. oblast rušivého vlivu, která jde do nekonečna (inf). Dlouhodobý vjem flikru se vypočítá z posloupnosti 12 hodnot krátkodobého vjemu blikání. Jedná se o dvouhodinový interval sledování vjemu blikání, který je označován jako dlouhodobá míra flikru. Lze použít vztah [3]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (1.1)$$

Po 95 % času, v libovolném týdenním období, musí být dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt} \leq 1$ , a to za normálních provozních podmínek. V závislosti na příčině a době trvání flikru se může reakce vjemu blikání měnit. U některých případů může  $P_{lt} = 1$  způsobovat obtíže, zatímco u těch jiných případů vyšší hladina  $P_{lt}$  obtíže vyvolávat nemusí. [3]



obr. 7 Vizualizace krátkodobého vjemu blikání  $P_{st}$  podle ČSN EN 50 160 ed.3 ve dvoutýdenním diagramu



obr. 8 Vizualizace limitních hodnot dlouhodobého vjemu blikání  $P_{lt}$  podle ČSN EN 50 160 ed.3 ve dvoutýdenním diagramu

### 1.1.4 Krátkodobé poklesy napájecího napětí

V instalacích odběratelů nebo ve veřejné distribuční síti mohou nastat poruchy, které způsobují krátkodobé poklesy napájecího napětí. Jedná se o nepředvídatelné, převážně stochastické jevy. Podle typu rozvodné sítě a místa sledování se četnost výskytu za rok značně mění. Navíc může být jejich rozložení během roku velmi nepravidelné. [3]

Statisticky se počítá s tím, že může být očekávaný počet krátkodobých poklesů napětí během roku od několika desítek až do jednoho tisíce, a to za normálních provozních podmínek. Krátkodobé poklesy napětí mívají dobu trvání obvykle kratší než 1 sekundu a hloubku poklesu menší než 60 %. Velmi často se mohou vykytovat krátkodobé poklesy napětí s hloubkou 10-15 %  $U_n$  v oblastech, kde probíhají rozsáhlé impedanční změny spínáním velkých zátěží, celých závodů apod. [3] Náhlý pokles napájecího napětí je vyhodnocen, pokud klesne napětí na hodnotu mezi 90 % a 1 % dohodnutého napětí ( $U_c$ ). Poté následuje obnovení napětí během krátkého časového úseku. Konvenční doba trvání krátkodobého poklesu napětí je mezi 10 ms a 1 minutou. Hloubka krátkodobého poklesu napětí je definována jako rozdíl mezi minimální efektivní hodnotou v průběhu krátkodobého poklesu a dohodnutým napětím. Změny napětí, které jsou mimo pásmo méně než 90 % dohodnutého napětí se nepovažují za poklesy napětí. [4]

### 1.1.5 Přerušení napájecího napětí

Obecně se rozdělují na krátkodobé a dlouhodobé. Roční výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí je v rozsahu od několika desítek až do několika stovek, a to opět za normálních provozních podmínek. Většina krátkodobých přerušení bývá kratší než 1 s a trvají do jedné minuty. [3]

Druhý typ přerušení bývá označován jako poruchový, neboť je obvykle způsobován vnějšími událostmi nebo vlivy, kterým dodavatel nemůže předcházet. Jedná se o dlouhodobé přerušení. Roční výskyty nebo doby trvání těchto přerušení není možné přesně specifikovat, neboť existuje široké spektrum faktorů, které je ovlivňují. Mezi ty patří např. povětrnostní podmínky, struktura uspořádání sítě nebo vlivy třetích stran apod. Roční výskyt dlouhodobých přerušení napětí, které jsou delší než 3 minuty, a zároveň kratší než 10 minut, mohou dosahovat až četnosti 50, a to za normálních provozních podmínek. Pokud se jedná o předem dohodnutá přerušení, tak se do četnosti výskytu přerušení nepočítají, neboť se tato přerušení ohlašují s předstihem a odběratel o nich ví dopředu, takže tato událost není klasifikována jako porucha. [3]

### 1.1.6 Dočasná nebo přechodná přepětí

Obecně se v rámci nominální frekvence dočasné přepětí mezi živými vodiči a zemí objevují během poruch v DS nebo v instalacích odběratele. Obvykle také zmizí, hned po odstranění poruchy. Přepětí mohou obvykle dosáhnout sdruženého napětí, a to v důsledku posunu uzlového bodu třífázové soustavy. Zkrat nebo zemní spojení na straně vn transformátoru může také za určitých okolností způsobit dočasné přepětí na straně nn. Jeho doba trvání je dána dobou zkratového proudu nebo zemního spojení. Všeobecně taková přepětí nepřekračují RMS hodnotu 1,5 kV. [3] Vrcholová hodnota přechodných přepětí obecně nepřekračují 6 kV. Stochasticky se samozřejmě mohou měnit výskyty i velikosti, neboť se jedná o nepředvídatelné poruchy. Doby čela přepětí se pohybují od ms až po méně než  $\mu$ s a jsou také velmi nahodilé. [3]

### 1.1.7 Nesymetrie napájecího napětí

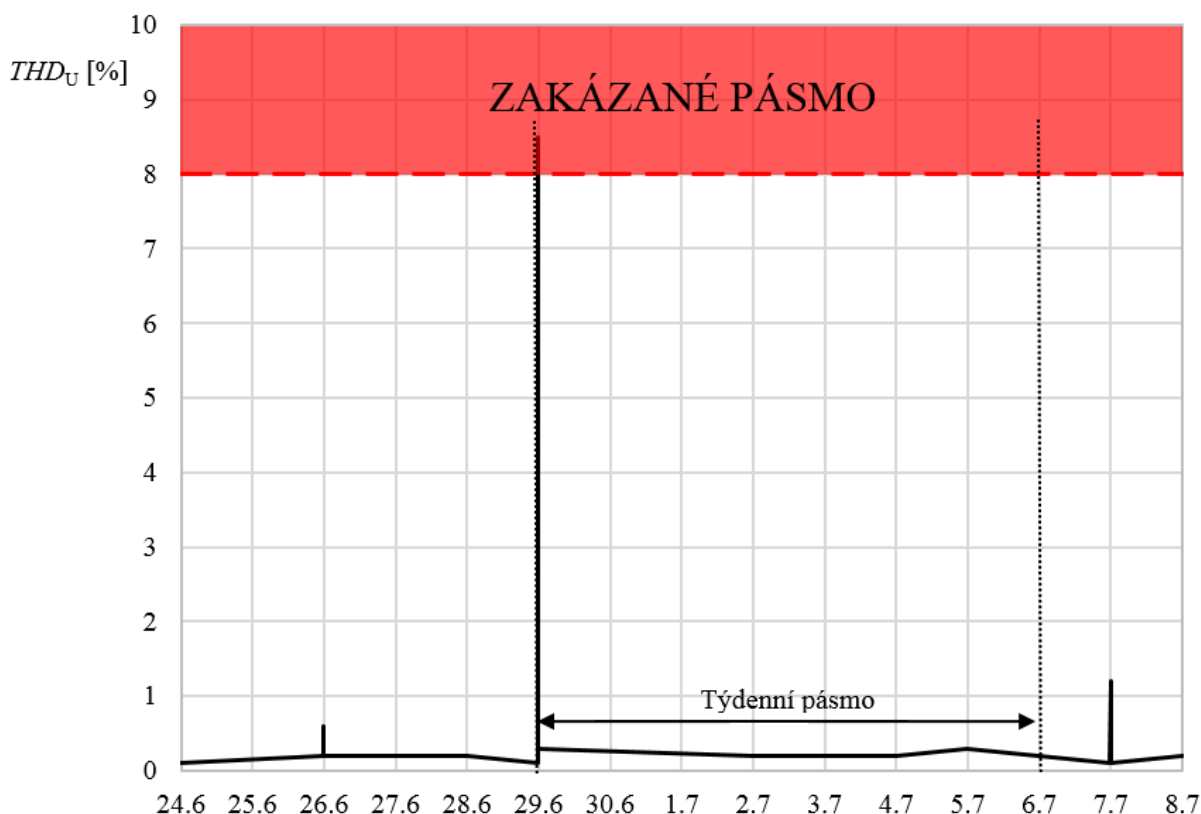
Zpětná složka napájecího napětí je měřena v desetiminutových středních RMS hodnotách. V libovolném týdenním období musí být 95 % těchto hodnot v rozsahu 0-2 % sousledné složky, a to za normálních provozních podmínek musí být.

Některé instalace jsou provedeny částečně jednofázové nebo dvoufázové. Takové případy mohou být při vyhodnocování zohledněny a v takovýchto odběrných místech se mohou vyskytovat nesymetrie až do asi 3 %. [3] Tato problematika zde není podrobněji řešena, protože vybudovaná platforma Off-Grid napájecího systému na půdě VŠB-TUO je pouze jednofázová (viz kap. 2).

### 1.1.8 Harmonická a mezharmionická napětí

Tyto parametry jsou také vyhodnocovány v 95% desetiminutových středních RMS hodnotách napětí pro jednotlivé harmonické. Samozřejmě za normálních provozních podmínek, což platí pro libovolné týdenní období. Obvykle se úrovně pro harmonické vyšších řádů 2,5 kHz neuvádějí, jelikož jsou pro jakékoliv další vyhodnocování tak nízké, že mnohdy nemohou být vyhodnoceny ani jako relevantní hodnoty s ohledem na přesnosti měřicích přístrojů. [3]

Činitel harmonického zkreslení  $THD_U$  na obr. 9 zahrnuje všechny harmonické až do 2 kHz a musí být  $\leq 8$  %. [3] Ostatní úrovně harmonických napětí jsou v tab. 3.



obr. 9 Vizualizace limitních hodnot činitele harmonického zkreslení napětí, které zahrnuje všechny harmonické až do 40. řádu, podle ČSN EN 50 160 ed.3 ve dvoutýdenním diagramu

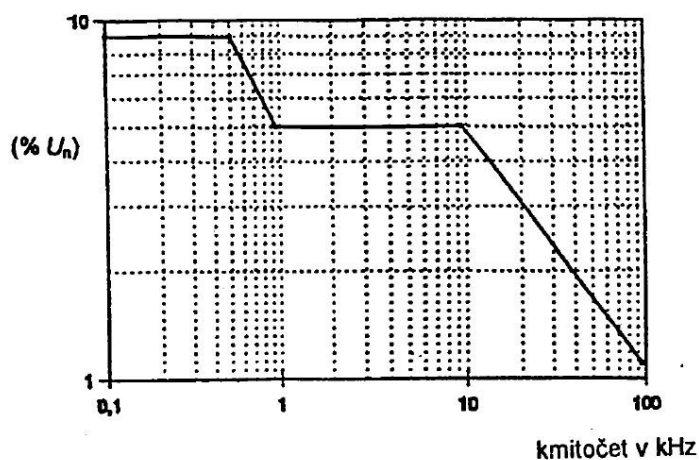
**tab. 3** Úrovně jednotlivých  $U_{\text{harm}}$  v předávacím místě v procentech  $U_n$  až do 25. řádu [3]

Liché harmonické				Sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
Řád harmonické h	Harmonické napětí %	Řád harmonické h	Harmonické napětí %	Řád harmonické h	Harmonické napětí %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25					

Používáním polovodičové techniky, a to zejména frekvenčních měničů, došlo k rozvoji mezipharmonických napětí. Velikosti těchto mezipharmonických nejsou v legislativě definovány a jsou v současnosti předmětem studií. V některých případech mohou mezipharmonické způsobovat i vjem blikání nebo rušení v systémech hromadného dálkové ovládání. [3]

### 1.1.9 Úroveň napětí signálů

Veřejnou DS lze využít i k přenosům informací. Tento princip využívají pouze některé země. Jedná se o systém, který je u nás znám jako HDO. Z hlediska kvality elektrické energie se vyhodnocuje střední hodnota napětí signálu. Na obr. 10 je křivka vyjadřující procentuální úroveň napětí signálu v závislosti na příslušné frekvenci. Tyto úrovně napětí musejí být po dobu 3 sekund 99 % dne menší nebo rovna právě hodnotám vyplývajícím z křivky na obr. 10. Nosné signály s kmitočtem v rozsahu od 95 kHz do 148,5 kHz se mohou v instalacích odběratelů používat pro přenosy informací po vedeních. Přenos signálů mezi odběrateli v rámci DS není dovolen, ale ve veřejné DS nn se bere v úvahu výskyt napětí na těchto frekvencích až do efektivní hodnoty 1,4 V. Kvůli vzájemné interferenci sousedících instalací může odběratel potřebovat ochranná opatření nebo vhodnou imunitu své instalace proti negativním vlivům těchto signálů. [3]



obr. 10 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech  $U_n$  ve veřejných DS nn [3]

Nosné systémy středofrekvenčních energetických vedení jsou od 3 kHz až po 20 kHz. Vysokofrekvenční potom od 20 kHz až po 148,5 kHz, přičemž jejich podrobný normativní popis se teprve připravuje. [5] Ostatní důležité parametry z oblasti sledování úrovně signálů jsou popsány v [6] a [5].

### 1.1.10 Srovnání a přehled PPQ

Srovnání kvalitativních parametrů v rámci napájecích systémů On-Grid vs. Off-Grid je relevantní pouze v rámci kolísání frekvence. Ostatní parametry kvality elektrické energie nejsou současnou legislativou definovány, a pro vyhodnocování analýz PQ jsou převzaty z definovaných limitů pro On-Grid napájecí systém. Zpracování ostatních limitů kvality elektrické energie předmětem odborných konferencí a vývoje. [1]

**tab. 4** Parametry kvality elektrické energie On-Grid vs. Off-Grid napájecího systému [1]

Parametry	On-Grid		Off-Grid	
	Limit	Doba	Limit	Doba
<i>Fluktuace pro f = 50 Hz</i>	49,5 ÷ 50,5 Hz	99,5 % roku	49 ÷ 51 Hz	95 % týdne
	47 ÷ 52 Hz	100 % času	42,5 ÷ 57,5 Hz	100 % času
<i>Kolísání pro U<sub>n</sub> = 230 V</i>	207 ÷ 253 V	95 % týdne	<i>Pro Off-Grid napájecí systémy tyto parametry stále nejsou definovány.</i>	
	195,5 ÷ 253 V	100 % času		
<i>P<sub>st</sub></i>	<i>Nedefinováno</i>			
<i>P<sub>lt</sub></i>	≤ 1	95 % týdne		
	<i>Nedefinováno</i>	100 % času		
<i>Nesymetrie napájecího napětí</i>	0 ÷ 2 % zpětné složky	95 % týdne		
	<i>Nedefinováno</i>	100 % času		
<i>THD</i>	Do 40. řádu harmonické ≤ 8 %	95 % týdne		
	<i>Nedefinováno</i>	100 % času		

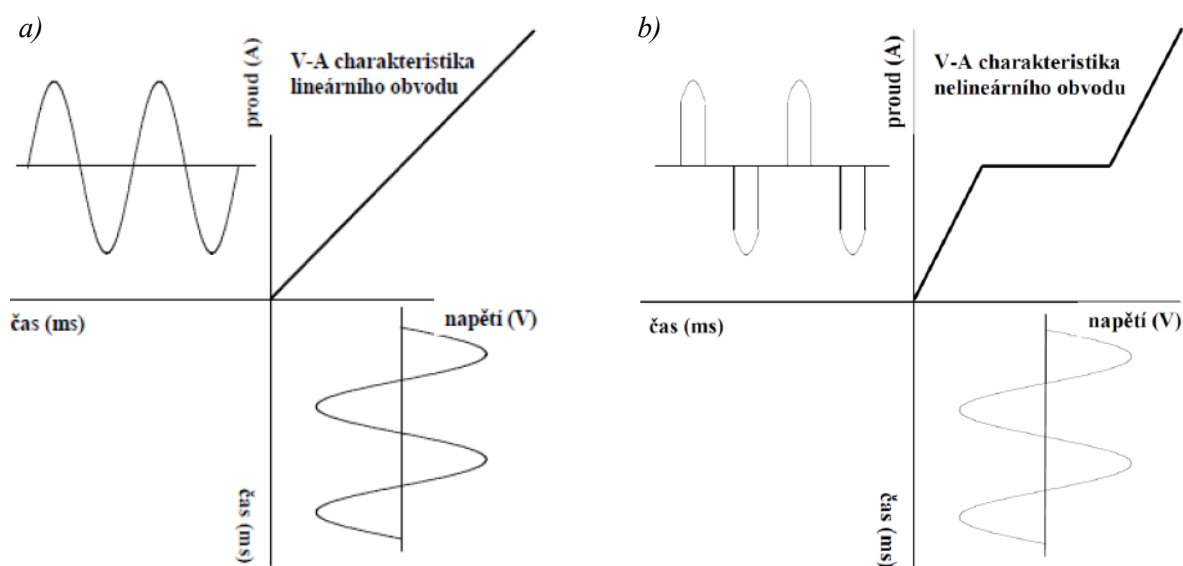
## 1.2 Zpětné vlivy na síť

Problematika rychlých změn napětí, celkového zkreslení tvaru průběhu napětí i proudu záleží dominantně na charakteru spotřeby. Skladba připojených spotřebičů ovlivňuje parametry kvality elektrické energie. Jedná se o téma tzv. zpětných vlivů na síť, které jsou aktuálním tématem na odborných konferencích. Právě se vzrůstajícím trendem využívání polovodičové techniky sice nastává minimalizace předchozích elektrických komponentů nebo zařízení, ale také vznikají problémy spojené s kvalitou elektrické energie. Např. tyristory svým zastoupením ve frekvenčních měničích, jež jsou dnes samozřejmostí u zařízení s vysokým výkonem, neboť dokáží eliminovat nežádoucí záběrný proud a plynule regulovat otáčky, jsou zdrojem vysokého harmonického zkreslení proudu. Při značném zatížení jsou schopny v rámci impedančních poměrů v síti ovlivnit také harmonické zkreslení napětí, pro které

jsou již předepsány kvalitativní limity. Takový stav nazýváme zpětnými vlivy na síť, protože spotřebiče generují rušivé vlivy, jež snižují kondici sítě. Typickým projevem je zvýšený podíl harmonických v síti nebo flickr efekt. Tato kapitola řeší příčiny vzniku problému spojené s kvalitou elektrické energie.

### 1.2.1 Harmonické složky

Obecně vznikají harmonické složky v nelineárních obvodech. Harmonickými složkami proudu nebo napětí se rozumí složky Fourierovy řady periodické veličiny větší než 1. Interharmonické jsou parazitní složky proudu nebo napětí, které se objevují mezi harmonickými. [4]



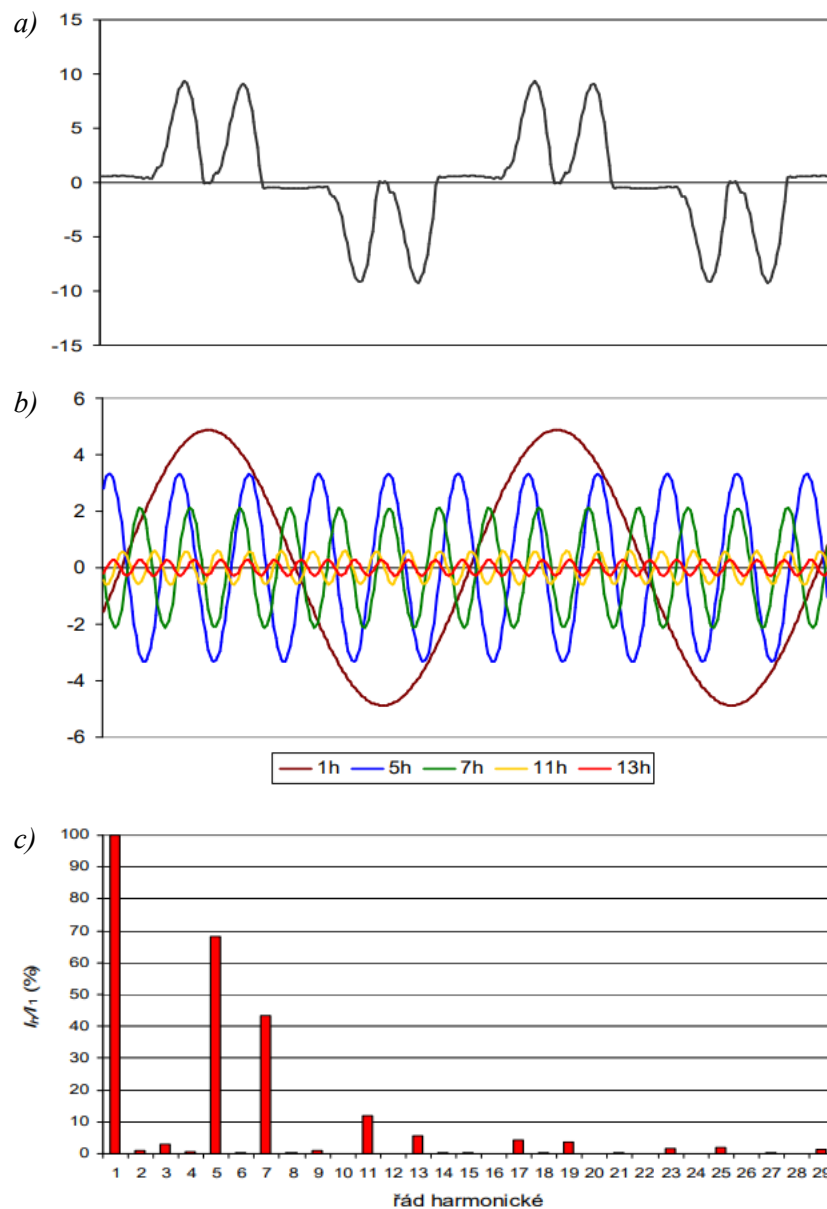
obr. 11 V-A charakteristiky obvodů [7]

a) Lineární obvody b) Nelineární obvody

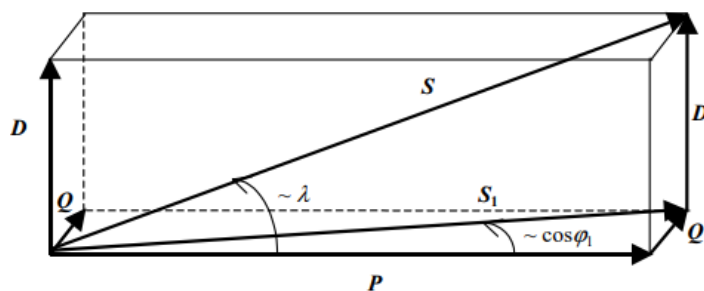
Pro názornou ukázkou je zde uveden jednoduchý příklad harmonické analýzy proudu odebíraného regulovaným pohonem. Na následující trojici obrázků lze vidět to nejnужnější pro nastínění celé problematiky harmonických složek. Na obrázku označeném písmenem c) je spektrum rozložení složek harmonického proudu. Jedná se o vztažené hodnoty jednotlivých harmonických k základní harmonické. Při těchto analýzách různých strojů nebo zařízení dochází zpravidla k podobným závěrům dle daného typu zařízení, které se liší většinou pouze velikostmi jednotlivých harmonických. Opět jde tedy o určitou kategorii spotřebiče nebo zařízení, která má své charakteristické parametry. V tomto případě jde o měnič kmitočtu. Dominantní je první harmonická, hned po ní pátá a sedmá a po nich jedenáctá a třináctá, což je typickým projevem měniče kmitočtu. Na části obrázku b) je rozložení sinusových průběhů ve změřeném podílu jednotlivých harmonických složek proudu. Pokud by neproběhla spektrální analýza proudu (př. viz obr. 12), mohli bychom změřit osciloskopem pouze skutečný průběh proudu jako na v části a) nebo měřit např. jeho RMS hodnotu multimetrem.

Harmonické složky proudu zvyšují celkový proud, a tím i zdánlivý výkon o tzv. deformační složku, která se označuje jako deformační výkon  $D$  [VA]. Pro hospodárnější provoz je tedy nutné filtrovat i vyšší harmonické proudu. V obvodech s výskytem harmonických je nutné také rozlišovat účinník na tzv. opravdový, či v některé literatuře uváděný jako PF (power factor), s označením  $\lambda$  [-] od toho klasického  $\cos\varphi$  [-]. Závislosti těchto veličin jsou patrné z obr. 13.





obr. 12 Příklad harmonické analýzy proudu odebíraného regulovaným pohonem [7]  
 a) Skutečný okamžitý proud b) Harmonické složky proudu c) Spektrum harmonických



obr. 13 Trojrozměrný graf výkonů [7]

### 1.2.2 Flikr efekt

Flikr neboli blikání je subjektivní pocit zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. Práh vnímání blikání (flikru) je minimální hodnota kolísání intenzity jasu nebo spektrálního rozložení, která vyvolává pocit blikání u vybraného vzorku obyvatelstva. Člověk není citlivý pouze na změny napětí, ale i na jejich frekvenci. Mezi spotřebiče nebo provozní stavy, které běžně způsobují v napájecí síti vjem blikání patří např. svářečky, elektrické obloukové pece, rozběh velkých motorů (speciálně je-li periodicky opakován), proměnlivá zátěž (např. řízený ohřev s velkým výkonem) nebo obecněji spínání velkých zátěží. Šíření flikru bývá prakticky lokálním problémem v nn síti a do vn sítě se generované rušení redukuje. [4]

Hodnoty krátkodobé míry vnímání blikání  $P_{st}$  nemají stanovenou teoretickou hranici překročení. Jedná se o hodnoty, které jsou definovány algoritmem pomocí váhových koeficientů a úrovně překročení (percentily).

$$P_{st} = (K_1 \cdot P_1 + K_2 \cdot P_2 + \dots + K_n \cdot P_n) \quad [4] \quad (1.2)$$

Dle IEC je v algoritmu definováno 5 úrovní.  $P_{0,1}$  je úroveň, která je překročena jen v 0,1 % doby ve sledované periodě,  $P_1$  v 1 %,  $P_3$  ve 3 %,  $P_{10}$  v 10 % a  $P_{50}$  v 50 % doby ve sledované periodě. K těmto úrovním patří také váhové koeficienty  $K_{0,1}$  (0,0314),  $K_1$  (0,0525),  $K_3$  (0,0657),  $K_{10}$  (0,28),  $K_{50}$  (0,08). Do výpočtu se nyní také zahrnuje tzv. vyhlazené hodnoty percentil, aby se zamezilo konstantnímu rušení ze zařízení, které mají stabilní cyklus zapnuto/vypnuto. To ovšem s výjimkou hodnoty  $P_{01}$ , protože se nemůže náhle změnit vlivem zabudované časové konstanty 0,3 s ve flikrmetrech. Chyba měřicí metody je pod 5 % a její přesný popis je uveden v UIE-IEC. [4]

Test byl potvrzen v praxi a ukázal, že tato metoda dává správné výsledky pro různé typy rušení, přičemž tato metoda byla vyvinuta tak, že lidé vnímají rušivý vliv flikru pro  $P_{st} = 1$ . Krátkodobá míra vjemu blikání  $P_{st}$  v intervalu 10 min je vhodná pro ověření jednoho zdroje rušení. Pro ověření skupiny zdrojů rušení jako například skupiny zátěží s delším a proměnlivým pracovním cyklem, se používá dlouhodobé míry vjemu blikání  $P_{lt}$ , která se vypočítá pro intervaly 2 hod. s využitím 12 hodnot  $P_{st}$ . [4]

### 1.3 Možnosti eliminace zpětných vlivů a optimalizačních opatření

V této kapitole je stručně popsána celková bilance optimalizačních opatření s ohledem na probírané téma. U většiny nejsou vysvětleny detailnější principy nebo konkrétní zapojení optimalizačního opatření, neboť se jedná o velice široké téma s bohatou historií. Tato kapitola má dopomoci k aktuálnímu přehledu současných opatření, které řeší částečně nebo úplně důsledek jevů, jež ovlivňují kondici kvality elektrické energie. Následující tabulka přehledně vystihuje hlavní atributy této problematiky, a to separací hlavních jevů ovlivňujících kvalitu dodávané elektrické energie, způsob popisu těchto jevů, jejich typické příčiny a příklad eliminační metody.

tab. 5 Přehled hlavních jevů ovlivňujících kvalitu dodávané elektrické energie [4]

Druh jevu ovlivňujícího PQ napájení	Způsob popisu	Typické příčiny	Příklad eliminace jevu
Prerušení Napětí	doba trvání	poruchy v síti, působení ochran, opravy a údržba	akumulátory energie, zdroje UPS, záložní napájení
Poklesy napětí	hloubka poklesu resp. velikost napětí, doba trvání	poruchy v síti, spínání velkých zátěží	ferorezonanční transformátory CVT [8], akumulátory energie, zdroje UPS
Kolísání napětí	krátkodobá, dlouhodobá míra vjemu flikru P, krátkodobý, dlouhodobý činitel flikru A	Přerušovaná zátěž, rozběh motorů, elektrické obloukové pece	zařízení na dynamickou kompenzaci, setrvačníky, volba klece motoru
Harmonická Napětí	velikost a spektrum, činitel harmonického zkreslení THD	nelineární zátěž, rezonance v síti	pasivní a aktivní filtry
Nesymetrie Napětí	poměr zpětné a sousledné složky napětí	Nesymetrie zátěže, nesymetrické poruchy	symetrizační členy, rovnoměrné rozložení 1f zátěže na fáze
Přepětí	vrcholová hodnota, doba trvání, křivka průběhu přepětí	úder blesku do vedení, spínání kondenzátorů, poruchy v síti	svodiče přepětí, filtry, izolační transformátory

Možnosti eliminace zpětných vlivů je vhodné také popsat podle parametrů kvality elektrické energie nebo způsobu zapojení sítě. Těmto dvou tématům se věnují následující podkapitoly.

### 1.3.1 Možnosti eliminace zpětných vlivů podle PPQ

Většina parametrů PQ spolu úzce souvisí, není tedy nutné vypisovat opět všechny PPQ a jejich optimalizační možnosti. Níže jsou popsány možnosti potlačení fluktuace napájecího napětí, napět'ové nesymetrie a úrovně harmonických složek.

#### 1.3.1.1 Možnosti potlačení kolísání napětí

Potlačení kolísání napětí lze docílit připojení spotřebiče nebo část sítě do sítě s dostatečným zkratovým výkonem, případně zvětšení zkratového výkonu. Zvětšit zkratový výkon lze zvětšením průřezu napájecího vedení, připojením synchronního generátoru nebo kompenzátoru, využitím sériové kompenzace nebo připojením do vyšší napět'ové hladiny. [4]

Dále je doporučeno u více kolísajících zařízení omezit souběh provozu těchto zařízení, použití speciálních kotev při rozbězích motorů. U svařecích lze provést změnu tvaru napět'ového pulsu, využít stejnosměrných agregátů nebo změnit takt svařování. Velké změny zatížení v síti jsou také v souvislosti s elektrickými obloukovými pecemi, tam lze využít statickou nebo dynamickou kompenzaci, připojit reaktor nebo přejít na dražší variantu stejnosměrného provedení EOP. [4]

### 1.3.1.2 Možnosti snížení napět'ové nesymetrie

Očekávaná nesymetrie se v praxi eliminuje speciální konstrukcí transformátorů (např. Scottův transformátor nebo Leblancův transformátor). [4]

Další možností je připojení tzv. symetrizačních členů. U těch je výhodné současně navrhovat i kompenzační řešení, neboť se jedná o připojení prvků RLC do sítě s takovými parametry, aby bylo celkové zatížení rovnoměrné ve všech fázích. Pokud je nesymetrie proměnlivá, musejí být i tyto symetrizační prvky napojeny na dynamickou regulaci podle aktuálního stavu zatížení sítě. S využitím aktivního řízení lze také docílit rovnoměrnějšího zatížení v síti, neboť lze jednotlivá zařízení spínat v následujícím období takovým způsobem, aby postupně vyrovnávaly nežádoucí nesymetrii. [4]

### 1.3.1.3 Možnosti snižování úrovně harmonických

Důsledek harmonických složek napětí nebo proudu lze omezit u jejich zdrojů, tedy u samotných spotřebičů, vhodnou konstrukční úpravou, zapojením nebo přidáním dalšího elektrického komponentu, jež sniží výsledné generování harmonických složek do sítě. Jedná se zejména o použití vícepulzních zapojení měničů, obvykle 12, ale i 18 nebo 24 pulzní. Lze použít i tzv. kvazivícepulzní měnič, což jsou dva (nebo více) šestipulzní měniče napájené z trojvinut'ového transformátoru, kde sekundární vinutí mají fázový posun  $30^\circ$ , pak pro 5. harmonickou je posun  $150^\circ$  a pro 7. harmonickou  $210^\circ$ . Nedojde sice k úplnému potlačení, ale eliminační charakter důsledku harmonické složky tento prvek má. [4] [9]

Další metodou je oddělení spotřebičů, které mají vyšší podíl harmonických od ostatních. Jedná se o separaci tzv. "špinavých spotřebičů", které generují rušivé vlivy od ostatních vhodným zapojením sítě - např. napájení ze samostatných přípojníc. Tato metodika nezmění velikost generování harmonických složek do sítě, ale generované harmonické složky alespoň negativně neovlivňují ostatní zařízení a mohou tak pracovat spolehlivěji nebo hospodárněji, a to i s ohledem na jejich životnost. Do obvodu, kde jsou vyseparované "špinavé spotřebiče" můžeme připojit potom eliminační prvek, který harmonické složky filtruje pasivně nebo aktivně. Při rozhodování, jaký filtr použít, zdali aktivní nebo ten pasivní, bude hrát největší roli určitě cena, protože aplikace aktivních filtrů se mohou pohybovat i v řádech milionů. Pasivní rezonanční filtry tvoří sériový rezonanční RLC obvod, naladěný na příslušnou harmonickou, který se připojí paralelně ke zdroji harmonických. Pro filtraci se obvykle připojí více paralelních rezonančních obvodů. Aktivní filtry se připojují paralelně nebo i sériově. Jedná se o připojený generátor opačné velikosti aktuálních harmonických složek řízený vhodným regulačním systémem, který i v dynamických stavech kompenzuje harmonické složky. [4] [9]

Také je zde možnost oddělenou přípojnici, která napájí spotřebiče s vyšším podílem harmonické složky, připojit do Off-Grid sítě nebo k samostatnému transformátoru. Obdobný způsob zapojení se využívá u tzv. pecního transformátoru u EOP, který eliminuje všechny harmonické složky a nesymetrie způsobem zapojení svého sekundárního vinutí do trojúhelníku. [4] [9]

Sériovým zapojením reaktorů dle druhu napájecí sítě lze také potlačovat účinky harmonických složek. Střídavé reaktory se zapojují na vstup měniče do série s napájecím zdrojem, zatímco stejnosměrné reaktory patří do stejnosměrného meziobvodu měniče. [9]

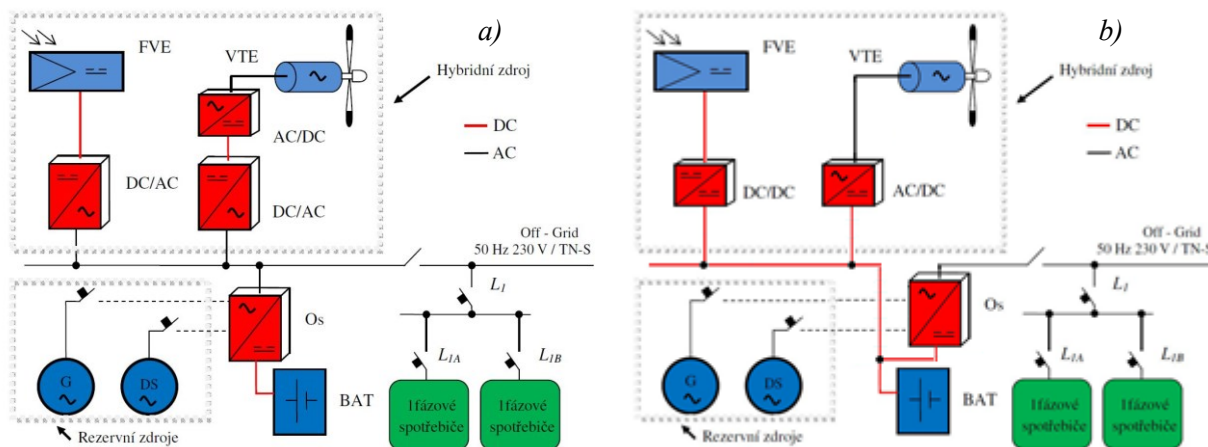
### 1.3.2 Možnosti eliminace zpětných vlivů způsobem zapojení sítě

Jako optimalizační možnost lze také využít změnu konfigurace v síti. To jde obecně ve třech základních bodech. Lze změnit topologii napájecí sítě, konfiguraci elektrického komponentu nebo lze spotřebiče spínat se zvoleným blokováním tak, aby jejich součinnost negativně neovlivňovala PQ.

#### 1.3.2.1 Topologie sítě

Kvalitu elektrické energie může ovlivnit také součinnost více zdrojů elektrické energie. Praktický příklad můžeme nalézt ve vybudované platformě Off-Grid napájecího systému, který je v zázemí těžkých laboratoří VŠB-TUO. V roce 2015 byla provedena analýza kvality elektrické energie, která přináší konkrétní výsledky fluktuací parametrů kvality elektrické energie, pokud je systém zapojen v koncepci By-pass, která se také označuje jako AC. Problémy s kvalitou elektrické energie nastávaly při náhlém odlehčení napájecího systému od zátěže při slunných dnech, kdy byl dodáván výkon z FVE1 a FVE2 téměř na maximum. Takové situace vedly k častým projevům fluktuace síťového kmitočtu. Naopak jarní dny, kdy bylo polojasno a byl proměnlivý úhrn slunečního svitu, vedly stochastické meteorologické stavy ke kolísání síťového napětí. [10]

Vzniklé flukтуаční problémy parametrů PQ se eliminovaly změnou topologie sítě z AC na DC. Výsledné parametry střídavé sítě TN-S totiž řídí pouze ostrovní měnič, který odpovídá za chod Off-Grid sítě a udržuje napětí i frekvenci AC sítě neustále v přípustných kvalitativních limitech, ovšem s ohledem na zkratový výkon sítě, který je dán právě ostrovním měničem. Podrobnějšímu popisu testovací platformy Off-Grid napájecího systému na VŠB-TUO je věnována kap. 2.



obr. 14 Zjednodušené blokové schéma Off-Grid systému, AC vs. DC topologie. [11]  
(G- elektrocentrála, Os- ostrovní měnič, L1- hlavní proudový okruh, L1A,B – vedlejší proudové okruhy)  
a) AC topologie b) DC topologie

Dalším příkladem, jak eliminovat problémy kvality elektrické energie vhodnou úpravou topologie, je použití symetrizačních členů nebo připojením speciálních transformátorů (Scottův transformátor, Leblancův transformátor nebo pecní transformátor). Tyto eliminační prvky PQ jsou však vhodné pro 3f systémy, a proto nejsou v této DP podrobněji rozebírány.

Také připojením aktivních nebo pasivních filtrů harmonických lze dosáhnout požadované PQ. Tyto aplikace bývají někdy spojeny a dimenzovány rovnou se zdrojem rušení. Typickým příkladem mohou být kompresory s výkonem v řádech  $10^5 \text{ V} \cdot \text{A}$ , u kterých bývá pro rozběh a regulaci otáček použit frekvenční měnič, a ten je dominantním zdrojem zpětných vlivů na síť. První eliminace zpětných vlivů

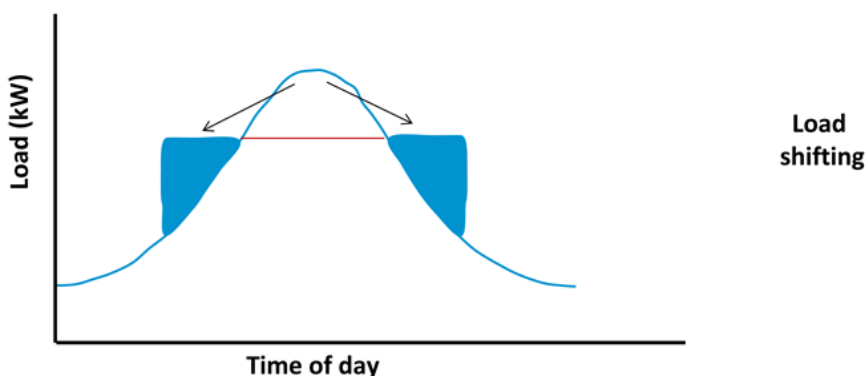
může být rovnou od výrobce frekvenčního měniče, který implementuje pasivní filtr a využije možnosti vícepulzního měniče kmitočtu (např. 12,18 nebo 24 pulzní měnič kmitočtu). Další možností je přikoupit filtr aktivní, který se svými rozměry a cenou může rovnat celému silovému rozvaděči pro kompresor. Takové řešení nebývá obvyklé, a to zejména kvůli investičním a provozním nákladům. Aplikace aktivních filtrů bývají spojeny s proměnlivou hodnotou harmonických složek, které se objevují při součinnosti více zařízení, jež generují tyto rušivé vlivy. Ovšem všechny zmiňované eliminační metody řeší pouze důsledek generování rušivých vlivů a snaží se je vybraným způsobem snižovat nebo úplně potlačit.

### 1.3.2.2 Posunování spotřeby (load shifting)

Posunování spotřeby, jež bývá někdy v odborné literatuře označováno z anglického load shifting, může být efektivní nástroj nejen pro řízení kvantity energií, ale i pro udržení kvalitativních limitů el. energie. Jedná se o princip, díky kterému se přeorganizovává připojení spotřebičů v síti dle času a aktuálního stavu sítě. Prvotní náznaky základního principu byly u klasického blokování různých spotřebičů mezi sebou např. s využitím stykačové kombinace. Dnes můžeme využívat výpočetní techniky, která dokáže kooperovat s databázovými systémy, jež mohou do budoucna tvořit silný základ umělé inteligence. Základní myšlenka posouvání spotřeby je založena na myšlence efektivního využívání el. energie. Nejdůležitější obvody jako např. světla, zásuvka pro PC musí být napájeny neustále, zatímco např. rychlovarná konvice nemusí nutně pracovat v součinnosti se zapnutou pračkou nebo lednicí. Pro Off-Grid napájecí systémy to znamená efektivnější využívání disponibilní energie v napájecím systému.

Pro systémy On-Grid tato technologie otevírá dveře do např. levnějšího nákupu el. energie apod. Jedním příkladem z mnoha může být situace, kdy řídicí systém energií může vyhodnotit stav, že napájecímu systému bude v následujícím období chybět disponibilní výkon a může tuto situaci optimalizovat tím, že např. chvilkově vypne rozsáhlou síť vytápěcích systémů po dobu, kdy teplota neklesne na takovou mez, aby ji člověk vyhodnotil jako chlad.

Pro nastavení posouvání spotřeby, z hlediska kvality elektrické energie, je nutné znát nejen základní el. parametry spotřebiče, ale i ty ostatní – kvalitativní (např.  $THD_u$ ,  $THD_i$  nebo  $P_{st}$ ). Posouvání spotřeby je pak nutné naprogramovat tak, aby nebyly překročeny limity kvality elektrické energie. Pokud jsou známy velikosti zpětných vlivů na síť jednotlivých spotřebičů, je nutné spotřebiče spínat takovou vhodnou sekvencí takovým způsobem, aby nebyly překročeny limity PQ nebo byly překročeny pouze do normou předepsanou mez z hlediska času a do výjimečně vyšší limitní hodnoty.



obr. 15 Princip posouvání spotřeby [12]

## 2 Testovací platforma Off-Grid systému

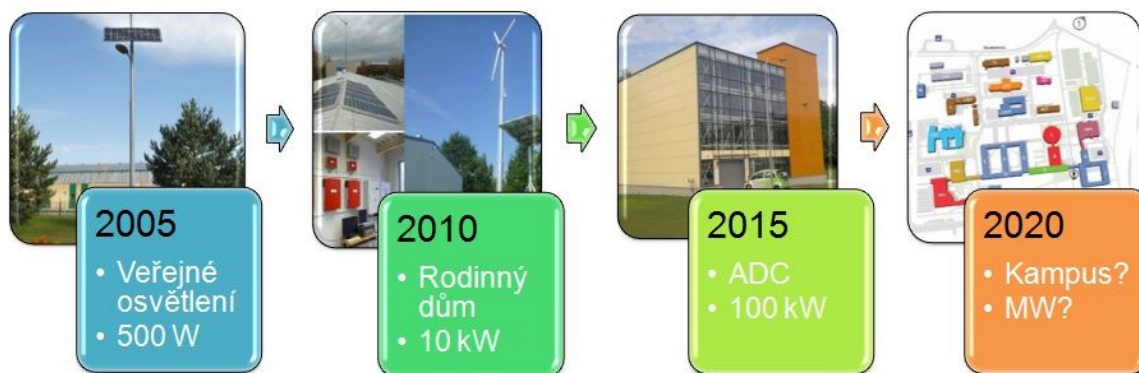
Off-Gridy patří zpravidla k napájecím systémům, jejichž zkratový výkon se pohybuje od  $10^3$  až po  $10^5$  V·A. Tyto napájecí systémy tak lze zařadit kategorie tzv. měkkých zdrojů el. energie. Naproti tomu DS má zkratový výkon řádově od  $10^5$  V·A a více. Můžeme ji považovat za tzv. tvrdý zdroj el. energie, protože takový napájecí systém není náchylný na velké změny impedance a v případě tzv. špičkových stavů sítě disponuje napájecí systém množstvím energie pro jejich následné pokrytí. Otázka přetížitelnosti souvisí nutně s vybraným zdrojem dodávané energie do systému. U OZE s využitím FVE se pohybuje přetížení obvykle kolem 10 % a jedná se o proudové zdroje el. energie, což je dáno jejich V-A charakteristikou. Pokud napájecí systém využívá VTE se synchronním generátorem, obvykle lze tento napájecí zdroj přetěžovat i mnohonásobkem jmenovitého proudu a jedná se o napěťový zdroj. Takové zdroje el. energie mohou být vhodné pro spouštění motorů, které mají záběrný proud násobně vyšší než hodnotu jmenovitého proudu. Lze tak omezit počet frekvenčních měničů nebo softstartérů, které využívají polovodičové prvky jako např. tyristory, jež jsou zdrojem tzv. zpětných vlivů na síť a jsou příčinou problémů spojené s kvalitou elektrické energie. Off-Grid s využitím OZE mají nevýhodu svojí stochastickou dodávkou el. energie, která je závislá na aktuálním meteorologickém stavu, jež není snadno predikovatelný. Při vybudování Off-Grid systému s OZE je také nutné přihlížet na strategickou polohu, která velmi ovlivňuje následnou dodávku el. energie, neboť právě OZE přeměňují sluneční záření nebo např. vítr na energii elektrickou, kterou posléze snadno běžný odběratel může využívat pro své potřeby (světlo, točivý moment apod.). Výhody napájecích systémů Off-Grid jsou např. autonomnost nebo možnost dodávky elektrické energie tam, kde není DS vybudována anebo dojde v DS k výpadku. [1]

Současným trendem jsou decentralizované autonomní Off-Gridy využívané jako zdroj elektrické energie, který pokryje špičkové stavy sítě. Problémy s kvalitou elektrické energie jsou stále aktuálním tématem, a po připojení takovýchto decentralizovaných Off-Gridů, je nutné optimalizovat síť nejen z hlediska energetické soběstačnosti, ale také k její energetické spolehlivosti v souvislosti s PPQ.

Způsob zapojení Off-Gridů lze obecně rozdělit na topologii střídavou a stejnosměrnou. Střídavou topologii potom dále podle počtu fází v systému. Jednofázové napájecí systémy lze aplikovat v případě klasických rodinných domů s disponibilním instalovaným výkonem jednoho ostrovního měniče od 2 do 8 kW. Při paralelní spolupráci tří ostrovních měničů lze dosáhnout jednofázového výkonu až 24 kW. Při způsobu zapojení na tzv. By-pass je výhodou možnost přímého hrazení spotřeby elektrické energie. To znamená bez ostrovního měniče, který je v takový moment nezatížen, protože tok energie jde ze zdroje přímo do spotřebiče. Nevýhodou jsou však problémy spojené s kvalitou elektrické energie a také měnící se zkratový výkon v napájecím systému v souvislosti se změnou počasí. Druhá možnost je s využitím regulátoru nabíjení. Tato možnost spadá do tzv. stejnosměrné topologie sítě, neboť hlavní přípojnicí v napájecím systému tvoří DC. Na ni jsou napojeny všechny zdroje elektrické energie, včetně akumulárního zařízení. Na tuto DC přípojnicí je také připojen ostrovní měnič, přes který jde veškerý tok energie. Znamená to, že parametry sítě jsou určeny ostrovním měničem. Zejména zkratový výkon, výstupní napětí, frekvenci i proud ovlivňuje tedy pouze jeden elektrický komponent.

## 2.1 Vybudovaná platforma v budově těžkých laboratoří VŠB-TUO

Historicky první koncept na VŠB-TUO, který byl realizován v souvislosti s Off-Grid systémy využívající OZE byl v roce 2005. Jednalo se o mikrogridovou síť, která byla vybudována pro napájení veřejného osvětlení o výkonu 500 W z malé VTE a FVE. Dalším stupněm ve vývoji bylo vytvořit testovací platformu rodinného domu. To se podařilo po 5 letech a napájecí systém má instalovaný výkon 10 kW, přičemž spotřeba je hrazena z Off-Grid napájecí sítě, která slouží mj. jako platforma pro analýzy a koncepce v této DP. V roce 2016 se spustilo v režimu Off-Grid také automobilové dopravní centrum (ADC). Jedná se o další milník ve vybudování autonomní chytré sítě. Instalovaného výkonu se pohybuje kolem 100 kW. Jako další projekt je vize napojení celého kampusu VŠB-TUO jako jeden uzavřený Off-Grid, který bude fungovat autonomně. Samozřejmě musí být takový napájecí systém nejen energeticky soběstačný, ale i energeticky spolehlivý. V těchto napájecích systémech je velmi důležité hlídat soudobost. Všechny spotřebiče nemusí být nutně připojeny v totožný čas a jejich spotřeba tak může být rozložena rovnoměrněji během celého dne. Mezi další vize patří Smart Grid systémy s využitím možnosti sdílení akumulační kapacity pomocí elektromobilů. Tento prostředek může také dopomoci pro pokrytí špičkových stavů nebo dopomoci k ekonomičtější bilanci celé sítě. [13]



obr. 16 Koncepce vývoje autonomního Smart-Grid systému na VŠB-TUO [13]

Koncepce zapojení na tzv. By-pass byla v rámci modelu fyzikální testovací platformy Off-Grid systému vybudována na akademické půdě VŠB-TUO v letech 2014-2015. Hlavní přípojnice v tomto systému je střídavá, a proto se tato topologie označuje jako AC. Testovací platforma dopomohla k vývoji adaptivního chránění, aktivního řízení energií a byla také analyzována z hlediska kvality elektrické energie nebo spotřeby. Aktuální zapojení testovací platformy je v topologii DC, která je popsána dále i se schémata zapojení. Na levé části obr. 14 je AC topologie, od které se opustilo v souvislosti s problémy PQ. Jednalo se zejména o problémy s fluktuováním napájecí frekvence, která byla závislá na aktuálním meteorologickém stavu. [10]

Problémy PPQ se eliminovaly změnou zapojení v síti. Také se zrušilo hybridního napájení Off-Grid systému. Aktuálně je větrná elektrárna odpojena a dodávaný výkon pro Off-Grid je pouze z fotovoltaických elektráren. Stále je využíván systém aktivního řízení spotřeby (ADSM), který bude zmíněn v této kapitole dále.



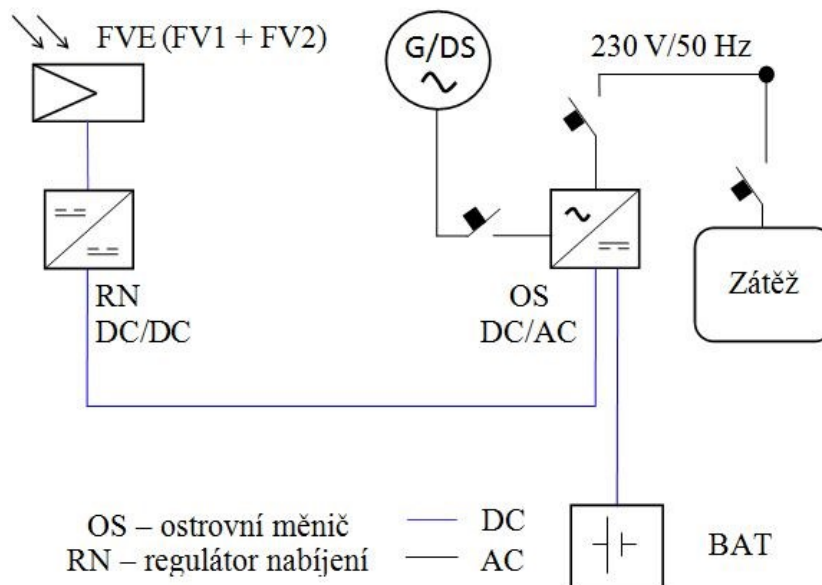


obr. 17 Jednotlivé zdroje a výkonová elektronika použitá v testovací platformě Off-Grid systému [14]

Odlišná topologie Off-Grid napájecího systému je s využitím regulátoru nabíjení. Jedná se o druhý způsob zapojení, který se na testovací platformě využil. Jeho blokové schéma se zapojením lze vidět na pravé části obr. 14. Ostrovní měnič zde odpovídá za výstupní parametry na AC straně, na kterou jsou připojovány spotřebiče. Výrobce obvykle dokládá parametry týkající proudových, napěťových a v případě střídavé sítě i frekvenčních rozsahů, které musí síť splňovat, jinak dojde k automatickému odpojení od zdroje. Přebytky elektrické energie lze uchovat v akumulacím zařízení. V testovací platformě toto akumulacím zařízení reprezentuje rozvaděč, ve kterém je 40 kusů Ni-Cd baterií od společnosti Ferak. Jedna baterie má nominální napětí 1,2 V DC a všechny jsou zapojeny do série, z čehož vyplývá, že hlavní přípojnice DC má nominální napětí 48 V DC. Na společnou přípojnic jsou připojeny také MPPT regulátory a ostrovní měnič. Tento systém má výhodnější ekonomickou bilanci v rámci pořizovacích nákladů. Navíc díky MPPT regulátorům dochází k efektivnějšímu nabíjení akumulacím systému s využitím Ni-Cd baterií. Poslední výhodou oproti topologii AC je zapojení veškerých spotřebičů přes ostrovní měnič, což znamená, že na AC přípojnic nejsou připojeny žádné další zdroje, které by mohly způsobovat problémy spojené s kvalitou elektrické energie. Tato DC koncepce má však i své nevýhody. Mezi ty patří zejména omezené možnosti pokrytí větší spotřeby elektrické energie. Napájecí systém má menší disponibilní výkon, který omezuje možnosti ostrovního měniče. [1] [11]

Stejnoseměrná topologie Off-Grid napájecího systému je tedy vhodná pro aplikace s nízkým instalovaným výkonem. Mezi další atributy této koncepce patří nižší konstrukční náklady v podobě krátkých vzdáleností sítě, kvůli DC rozvodu, což v jiných rozsáhlejších aplikacích může být i nevýhoda. Provoz těchto systémů je zpravidla na nominálních hladinách 12, 24 a 48 V DC. Nízké napětí a vysoké provozní proudy patří zásadním nevýhodám, neboť dochází k nutnosti zvolení vyšších průřezů kabelů,

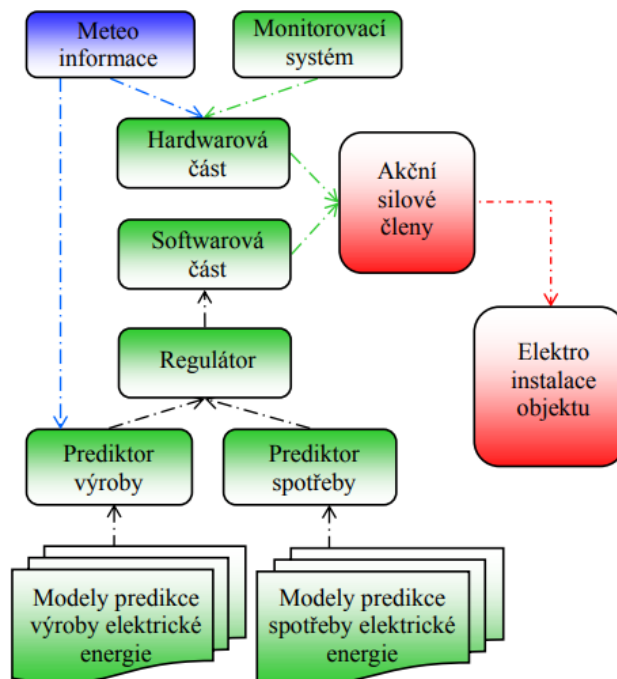
jež minimalizují ztráty na vedení. Podstatná nevýhoda je také zatím stále omezená dostupnost komerčních spotřebičů na stejnosměrné napětí. K Off-Grid systému samozřejmě lze připojit spotřebiče napájené DC proudem, ale ty v současnosti nejsou součástí testovací platformy. Celkové bilanci spotřebičů v testovací platformě je věnována kap. 3.1. [1] [15] [16] [17]



obr. 18 Aktuální zjednodušené blokové schéma OS (DC topologie) s využitím pouze FVE [1]

Popisovaný Off-Grid má integrované OZE s využitím FVE, které přeměňují sluneční záření na energii elektrickou. Dodávka elektrické energie má stochastický charakter, neboť je závislá na meteorologických veličinách, jež nejsou snadno predikovatelné. Tím jsou kladeny vysoké nároky na management systému v oblasti spotřeby. Efektivnějším řízením spotřeby můžeme docílit daleko vyšší účinnosti v rámci energetické soběstačnosti. Díky akumulaci elektrické energie v době, kdy je energie přebytek, může systém fungovat dále v období, kdy neprobíhá dodávka elektrické energie využitím OZE. Řídicí systém musí mít určené priority pro řízení jednotlivých spotřebičů. Jedná se tedy o kategorizování spotřebičů pro jejich následné spínání nebo odepínání dle příslušných relevancí. Tomuto odvětví je věnována samostatná kap. 3 s vlastním řešením, které je zaměřeno na vybudovanou testovací platformu na Hardu nyní nově i s ohledem na energetickou spolehlivost systému.

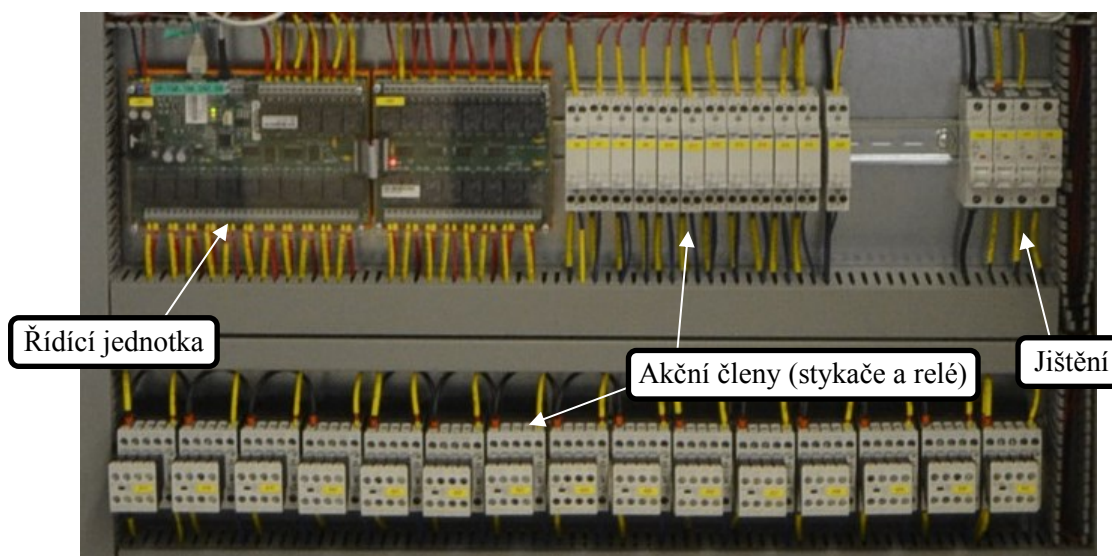
V minulosti byly provedeny analýzy spotřeby a vytvořen koncept, který určuje tři základní kategorie. První kategorii tvoří spotřebiče, jejichž provoz je trvalý a spotřebovávají elektrickou energii v průběhu celého dne, další kategorii tvoří spotřebiče (např. pračka, myčka), jejichž provoz se dá odložit na období, kdy lze předpokládat dobré podmínky pro výrobu elektrické energie z hybridních zdrojů elektrické energie. Třetí skupinu tvoří spotřebiče, jejichž provoz je závislý na vůli provozovatele, jedná se například o televizor, počítač. Řízení toků energií mezi jednotlivými komponenty připojených do Off-Grid systému je možné realizovat s využitím řídicího systému. S využitím aktivního systému řízení pro hospodaření a řízení toků elektrické energie v Off-Grid systému je optimalizováno připojení jednotlivých spotřebičů v rodinném domě. Na základě informací o predikované hodnotě elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, předem definovaných priorit připojení jednotlivých spotřebičů a aktuální hodnoty kapacity akumulačních zařízení, může aktivní řídicí systém bezpečně poskytnout napájení Off-Grid systému po celý rok. [18]



obr. 19 Blokové schéma aktivní energetické jednotky Off-Grid systému [18]

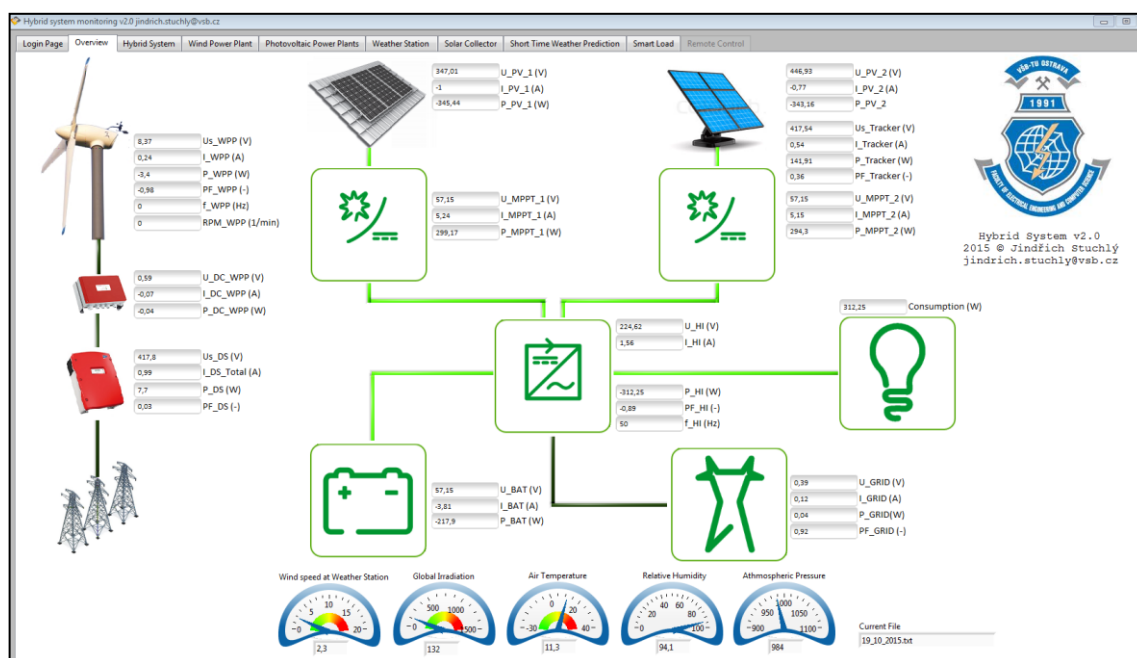
Vstupní data pro rozhodování řídicího systému jsou přebírána z meteorologických modelů (predikce výroby) a na jejich základě řídicí systém predikuje předpokládanou disponibilní energii a připravuje plán provozu jednotlivých spotřebičů, tak aby vždy byly uspokojeny požadavky na provoz domácnosti i s optimálně zvolenou rezervou energie pro krytí nenadálé potřeby elektrické energie. [18]

Testovací platforma Off-Grid napájecího systému má zaimplementovaný systém aktivního řízení, který je označen zkratkou ADSM, jež vychází z anglického Active Demand Side Management. Tento systém řízení je založený na metodách umělé inteligence, který prošel mnoha revitalizacemi. Celá energetická koncepce byla navržena tak, aby napájecí systém byl schopen fungovat autonomně a zároveň mohla testovací platforma Off-Gridu reprezentovat typický rodinný dům. [18]



obr. 20 Řídicí část ADSM na Hardu

Fyzikální model Off-Grid systému byl doplněn systémem měření, který umožňuje měřit hodnoty veličin na jednotlivých komponentách systému. Toto podrobné osazení senzory umožňuje v podstatě kontinuálně monitorovat dílčí účinnosti celého systému. S takto vytvořeným monitorovacím systémem je možné s velkou přesností určit celkovou účinnost systému, definovat podíl jednotlivých zdrojů v rámci dlouhodobého časového intervalu a specifikovat tak využitelnost navržené energetické koncepce pro libovolné meteorologické a energetické podmínky nejen v místě umístění vybudované testovací platformy Off-Grid systému. Důležitou součástí monitorovacího systému je i hodnocení meteorologických poměrů. Meteorologická stanice poskytuje dostatek naměřených hodnot o hustotě globálního slunečního záření tak i směru a rychlosti větru. Veškeré naměřené hodnoty jsou následně zpracovávány a vyhodnocovány pomocí G jazyku (prostředí LabView – Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) a následně pomocí tohoto jazyku i vizualizovány. Veškeré výsledky z monitorovacího systému jsou ukládány pro následný postprocessing do databáze dlouhodobých naměřených hodnot v minutových intervalech a jsou publikovány formou webového rozhraní na internetové doméně, která je pro testovací platformu Off-Grid systému vytvořena. [18]



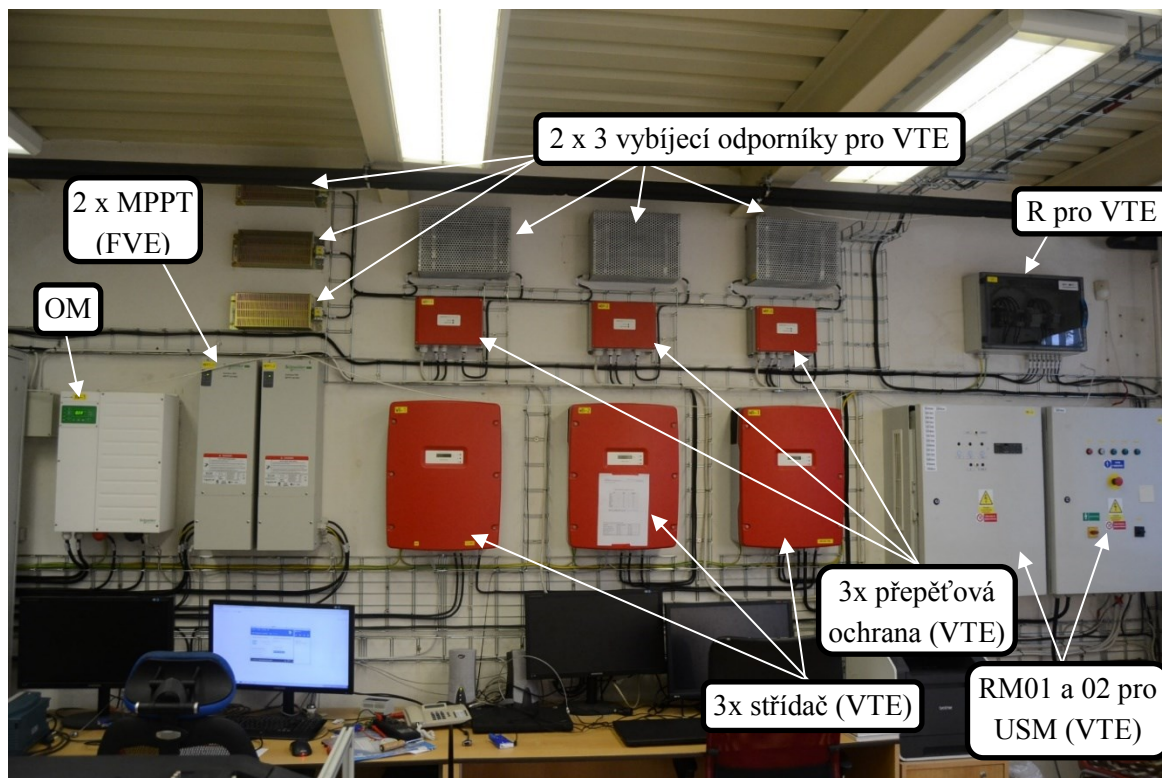
obr. 21 Záznamový monitorovací SW [1]

S takto vytvořenou databází naměřených hodnot je možné optimalizovat a vyhodnotit řetězec jednotlivých konverzí elektrické energie, toků elektrické energie a provozních stavů v Off-Grid systému. Hlavním cílem monitorovacího systému je poskytnout systému řízení dostatek informací o aktuálním stavu počasí, stejně tak o předpovědi relevantních meteorologických veličin na nejbližší období, dále pak informace o stavu nabití akumulčních baterií a informace o předpokládané spotřebě v následujícím časovém období. Plán spotřeby vychází z databáze provozních stavů a z analýz spotřeby, které přináší výsledky o tom, že běžné zvyklosti domácnosti jsou do značné míry stereotypní s tím, že musí být alokována jistá část akumulované elektrické energie na krytí náhodné spotřeby elektrické energie. [18]

Samotný řídicí systém ADSM potom sám zajišťuje spínání jednotlivých spotřebičů, které by byly do systému přímého spínání možné zařadit. Systém řízení z aktuálních hodnot jednotlivých měřených veličin je schopen vyhodnotit a následně uživatele informovat o technickém stavu jednotlivých zdrojů, jakož i stavu akumulární části systému. Aktivní řídicí systém za podpory moderních IT technologií doporučuje uživateli plán spotřeby, který vychází z databáze provozních stavů, analýzy spotřeby, hladiny nabití akumulátorů, z informací poskytnutých monitorovacím systémem, předpovědi relevantních meteorologických veličin a predikcí výroby a spotřeby. Samotný řídicí systém doporučuje dle algoritmu řízení spínat vybrané spotřebiče nebo jednotlivé napájecí silové napájecí okruhy a informuje uživatele o stavu jednotlivých zdrojů i celého systému. Samotný vývoj Off-Grid systému vybudovaného v areálu VŠB-TUO může být rozdělen do třech základních kroků. Prvním je klasifikace toků energií, druhým vytvoření scénářů chování a třetím podrobení vytvořené databáze k testování. První etapa spočívala v dlouhodobém měření na vybraných objektech. Toto měření současně s měřením relevantních meteorologických a geomorfologických veličin vedlo k vytvoření standardizované databáze s klasifikací toků energií a sestavení typizovaného denního diagramu zatížení pro danou domácnost, kterou reprezentuje rodinný dům. [18]

Vytvořený typizovaný denní diagram zatížení, společně s experimentálním měřením domácích spotřebičů slouží jako podklad pro nastavení programovatelné zátěže a implementaci této zátěže do fyzikální platformy rodinného domu. Druhá etapa představovala vytvoření různých scénářů chování vybraných objektů – toky energií uvnitř systému, které odpovídají situacím každodenního života. Následovala optimalizace provozu Off-Grid systému s respektováním specifických požadavků. Mezi tyto požadavky patří zejména autonomní provoz, maximální využití obnovitelných zdrojů energie a bezpečnost, či spolehlivost provozu. Jako podpůrnou informaci pro optimalizaci toků výkonů v energetické jednotce jsou využity informace z predikčního modelu výroby elektrické energie obnovitelných zdrojů. S využitím již vybudovaného detailního monitorovacího systému je sledován každý operátorský zásah ve formě zápisu do textového souboru včetně všech relevantních veličin. V třetí etapě byla vytvořena ucelená databáze a ta byla následně podrobena testování pomocí prvků umělé inteligence s nalezením vazeb mezi jednotlivými veličinami. Cílem využití metod umělé inteligence je aplikace pro správu energetických toků s respektováním specifických požadavků uvedených výše. Samotnému použití metod umělé inteligence předcházela testovací provoz k případnému zjištění možných nedostatků. Aktivní systém řízení s podporou metod umělé inteligence realizuje dílčí kroky, přičemž operátor vyhodnocuje odchylku reakčního zásahu systému řízení od požadované hodnoty. V současné době probíhá testování energetické jednotky s použitím aktivního systému řízení společně s vyhodnocením dosaženým výsledků. [18]



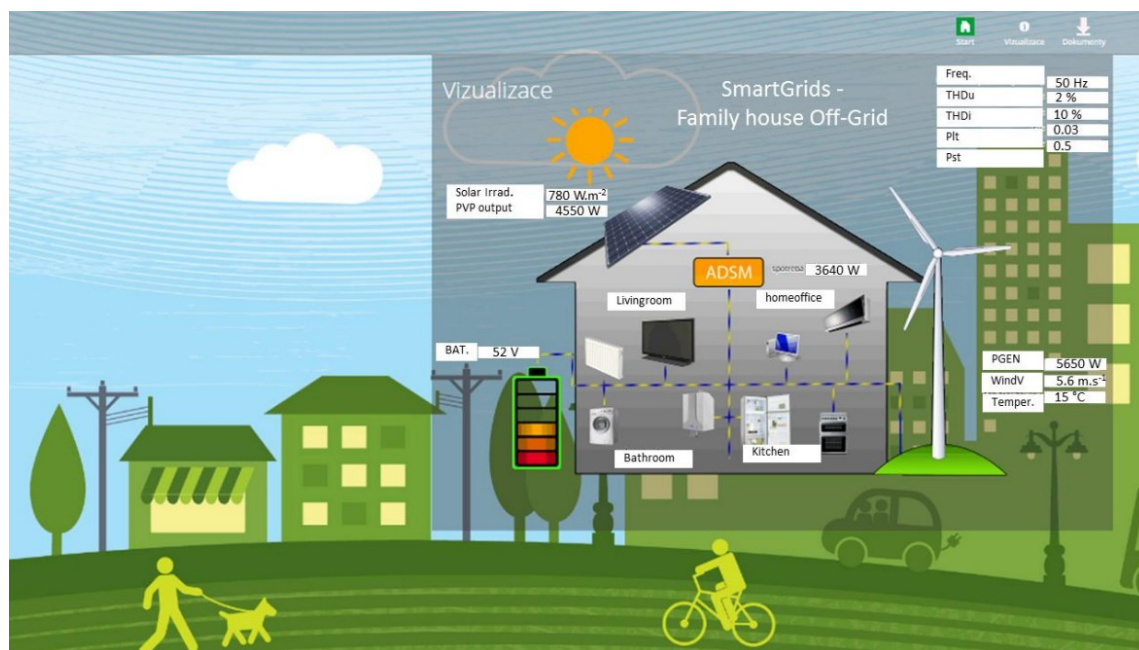


obr. 22 Pracoviště na Hardu

Zdrojová část testovací platformy může být doplněna o benzínový, dieselový nebo LPG agregátem, popř. mikrokogenerační jednotkou pro situace, kdy nebude dostatek disponibilní energie z obnovitelných zdrojů a akumulačních baterií. Tomuto stavu se systém bude snažit vyvarovat určením priorit jednotlivým spotřebičům nebo jejich skupin a včasnému odpojení spotřebičů s nízkou prioritou. [18]

Na základě aktuálních meteo informací společně s predikčními modely výroby a spotřeby společně s aktuálními hodnotami reguluje systém toky energií uvnitř systému pomocí aktivních silových členů implementovaných do elektroinstalace objektu. Tento systém je možné po úpravě komunikačních technologií instalovat například do již existujících silových obvodů objektu s minimálními úpravami, což je také finální vize celé koncepce testovací platformy Off-Grid napájecího systému. [18]

V minulosti již byly vytvořeny také koncepty pro interpretaci dat a struktury zapojení jednotlivých komponent i pro běžného uživatele. Ty lze ovládat nebo sledovat komfortním způsobem z běžného prohlížeče. Náhled webové prezentace lze vidět na obr. 23 a rozhraní, které se označuje také někdy jako Quido, lze vidět na obr. 24.

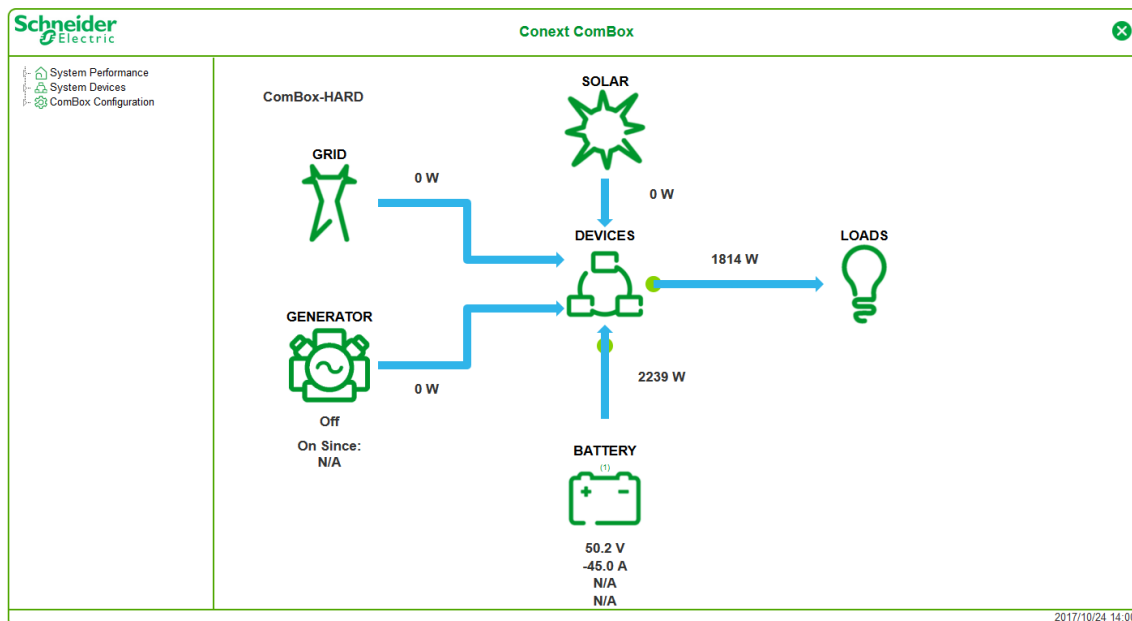


obr. 23 Webová prezentace stavu energetickej bilance rodinného domu s využitím ADSM [19]



obr. 24 Přehled rozhraní Quido pro manuální spínání jednotlivých spotřebičů

Dalším monitorovací systém je od renomované společnosti Schneider Electric. Jedná se o hotový produkt, který není v rozpracované fázi jako předchozí model. Systém Conext™ je vhodný pro provozovatele fotovoltaických (solárních) elektráren, protože jim systém umožní výtěžnost vzdáleně monitorovat pomocí zařízení, které si sami zvolí – přes osobní počítač PC, tablet, nebo přes systém pro správu a řízení budovy. Datové záznamy a události pro každé zařízení, stejně jako grafické zobrazení historických a aktuálních dat o výrobě a výtěžnosti solárního systému jsou snadno revidovatelné pomocí webového prohlížeče nebo tabletu Android. Elektroinstalatéři nebo údržba může změnit nastavení přístrojů a zařízení Conext během uvedení do provozu a také reagovat vzdáleně 24/7 na výstrahy systému. Rozhraní Modbus spojuje zařízení Conext se zařízením třetích stran a systémy pro řízení budovy. Integrovaná karta Micro-SD ukládá doplňková data pro další použití. [20]



obr. 25 Rozhraní Conext ComBox pro sledování stavu Off-Gridu

## 2.2 Měření kvality elektrické energie

Pro zjišťování aktuálního stavu PQ v Off-Grid napájecím systému se prakticky používají tři varianty. První varianta je nejflexibilnější, neboť probíhá klasickým přenosným analyzátořem sítě. Další variantou je možnost implementace některého ze sítových analyzátořů přímo do rozvaděče a propojit ho se systémy DAQ nebo SCADA. Tento systém s analyzátořem sítě je součástí rozvaděče REM1, který spíná jednotlivé zátěže. Konkrétně se jedná o analyzátoř SMC 144 od společnosti KMB. Mezi vizemi je zrealizace doplnění stávajícího měřicího systému, který funguje díky virtuální instrumentace, o modul, který umí měřit a analyzovat online také PPQ.

### 2.2.1 Přenosný analyzátoř PQ

Model ENA300 byl speciálně vyvinut jako cenově přístupné řešení do školních a univerzitních laboratoř. ENA300 se skládá z programovatelného modulu úpravy signálu (pro 4 napětí a 4 proudy) a 16-bitového A/D převodníku s USB rozhraním. Model ENA300 nemá vestavěnou procesorovou jednotku, a proto musí být připojen přes USB rozhraní k PC s operačním systémem Windows, na kterém je spuštěn firmware analyzátoř. ENA300 používá stejný firmware jako celá série analyzátořů řady ENA a proto poskytuje stejnou funkčnost a přesnost měření jako jakýkoliv jiný model ENA. [21]





obr. 26 Přenosný analyzátor sítě ENA 300 [21]

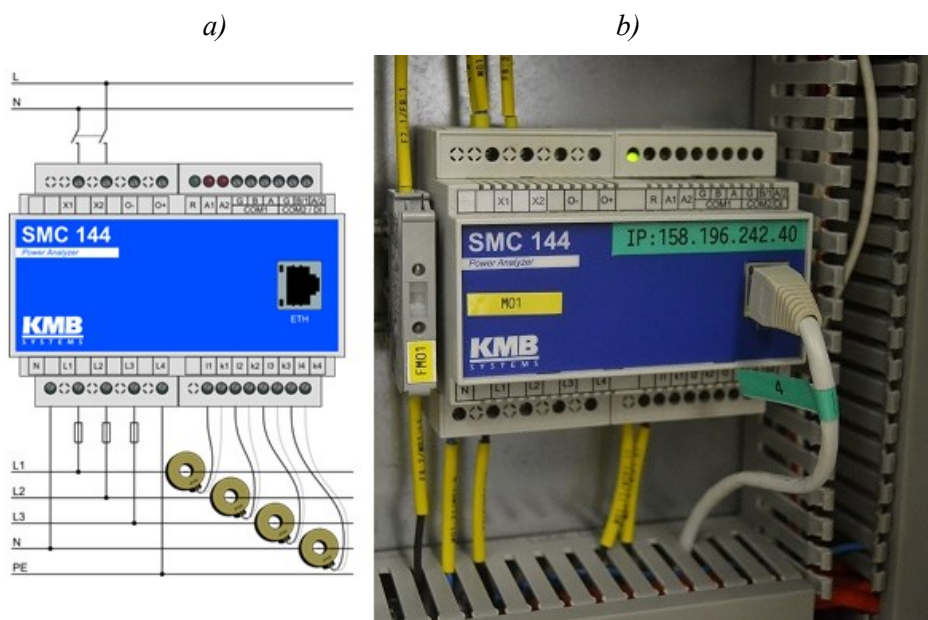
Naměřené data je poté nutno vyexportovat pro další zpracování. K tomu slouží BK-Report. Jedná se o komfortní nástroj pro zobrazení, porovnání, statistické zpracování, tisk protokolů a export dat uložených během měření analyzátorů BK-ELCOM. Data mohou být analyzována v časové oblasti, ve frekvenční oblasti, je k dispozici statistická analýza a speciální analýza dle EN 50160. Protokoly z měření mohou být tištěny nebo uloženy do BMP a HTML. V případě potřeby je možné data exportovat do ASCII. BK-Report je naimplementován jako klient-server aplikace, a proto mohou být data zpracovávány lokálně nebo vzdáleně. [22]



obr. 27 Ukázka rozhraní BK-Report [22]

## 2.2.2 Monitoring PQ

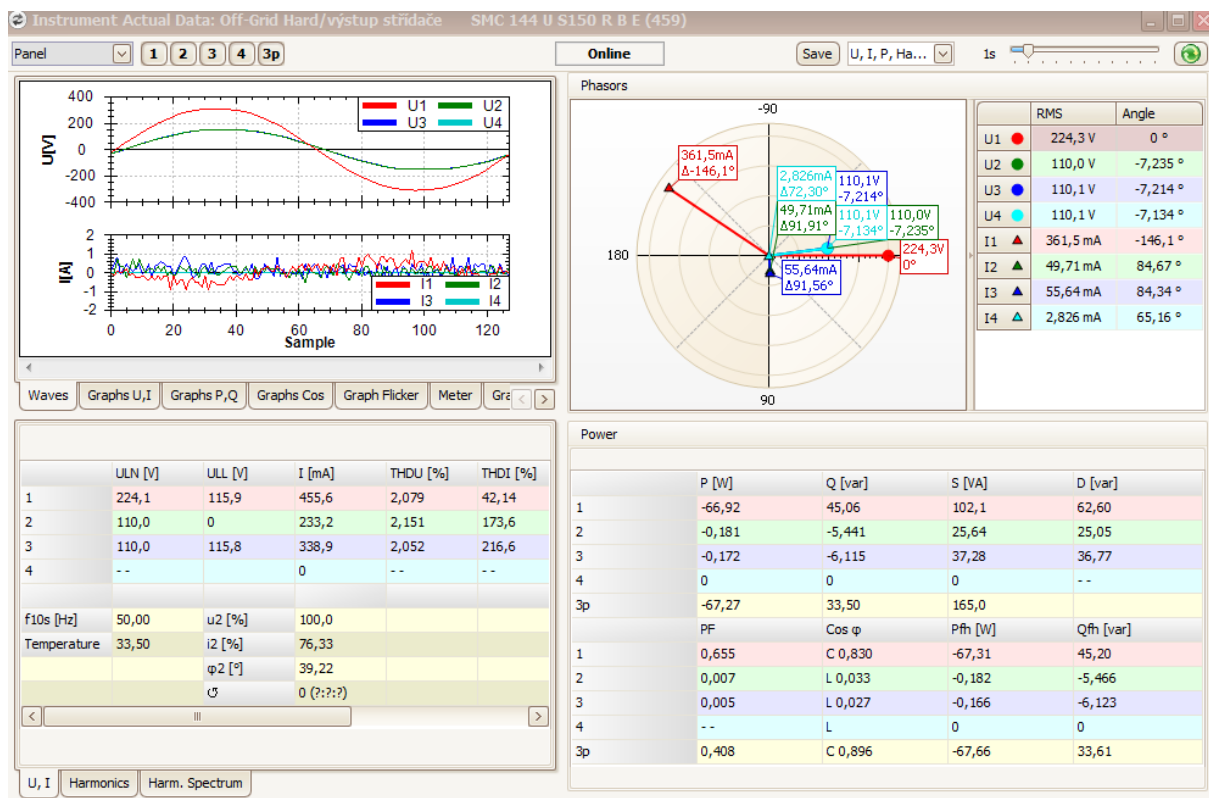
Do Off-Grid systému byl integrován také síťový analyzátor SMC 144 do rozvaděče, který řídí spínání spotřebičů (REM1). Analyzátor má svoji paměť a širokou nabídkou volitelných rozhraní pro vzdálenou komunikaci. SMC 144 je navržen pro dálkové sledování a záznam spotřeby elektrické energie, její řízení a monitoring parametrů kvality. Je určen pro snadnou instalaci na DIN lištu a nabízí širokou paletu komunikačních rozhraní pro aplikace v automatizaci, v oblasti řízení moderních budov, dálkového dohledu na infrastrukturu anebo optimalizace odběru. Jeho vstupy, výstupy a komunikační rozhraní lze rozšiřovat zákaznickými přídatnými moduly. Analyzátor SMC 144 implementuje protokoly ModBus a M-Bus a je ideálním zdrojem dat pro každý moderní systém SCADA. Je podporován také aplikací ENVIS. Do vnitřní paměti ukládá zátěžové profily, odečty elektroměru, události a pravidelně i všechny ostatní měřené veličiny. V komplexních řídicích systémech jej lze snadno kombinovat zejména s přístroji PA 144 (podružný elektroměr) a SMD 118 (AC a DC analyzátor), více v [23].



obr. 28 Analyzátor SMC 144

a) Obecné schéma zapojení [23] b) Integrace analyzátoru v REM1 na Hardu

Aplikace ENVIS je určena k vyhodnocování měřených dat o spotřebě energie, hodnotách měřených veličin a o kvalitativních parametrech. Pro rychlé a snadné vyhodnocení dat jsou připraveny předdefinovaná hlášení (reports). Nové funkce lze snadno doplňovat prostřednictvím pluginů. Data z přístrojů lze archivovat v komprimovaných CEA souborech či ukládat v databázi MS SQL serveru. Pro potřebu pokročilejších analýz je lze exportovat do tabulkového procesoru (formát XLS, CSV). Instalace ENVIS také obsahuje jednoduchý nástroj ENVIS. DAQ pro konfiguraci, dohled a jednoduchou vzdálenou správu přístrojů. Program nabízí i možnost online sledování stavu přístroje a poskytuje základní funkce pro analytické zpracování a komfortní vizualizaci zaznamenaných jevů. Systémovou službu ENVIS. Online je pak možné nastavit na periodický odečet archivů a jejich automatické vyhodnocování. [24]



obr. 29 Rozhraní ENVIS pro sledování stavu PQ z SMC 144

## 2.2.3 Sdružený rozvaděč REM1 (ADSM + PQA + DAQ + adaptivní chránění)

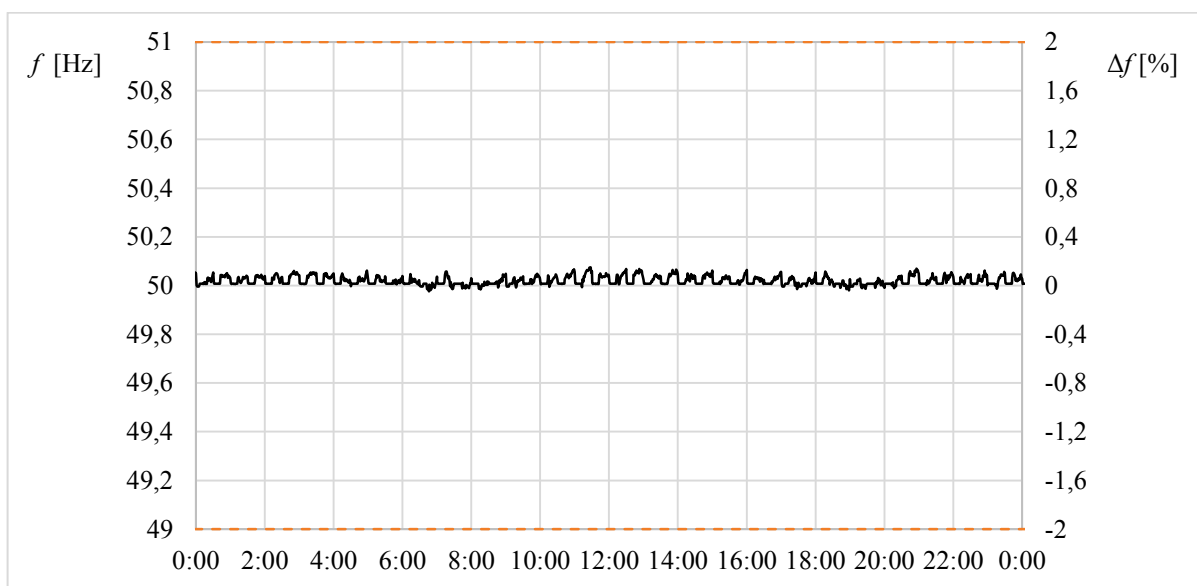
V minulosti byl zhotoven samostatný rozvaděč pro ADSM, adaptivní chránění i hlídání stavu PQ a celkový monitoring parametrů v Off-Gridu. Dnes jsou všechny tyto prvky systému implementovány do jednoho sdruženého rozvaděče s označením REM1, který obsahuje všechny tyto dílčí prvky testovací platformy pro autonomní provoz Off-Grid napájecího systému. Detailní popis celé platformy, včetně výzbroje nejen REM1, je součástí příloh DP.

## 2.3 Analýzy kvality elektrické energie

Především analýzy kvality elektrické energie jsou z období 2014-2017. Jedná se o období, podle kterého lze popsat všechny provozní stavy pro oba typy topologií i včetně období, kdy byla odpojena VTE. Důvodem odpojení VTE byla hypotéza ovlivnění fluktuace kvalitativních parametrů vzájemnou interferencí OZE. Prognostika se prokázala následnou optimalizací topologie sítě s dalším měřením a vyhodnocením i v odborných člancích např. v [10]. Dodávaný příkon do Off-Grid sítě tak zajišťovala pouze jeden monokrystalický a jeden polykrystalický fotovoltaický panel o parametrech viz [25]. Maximální výkon Off-Grid napájecího systému je dán ostrovním měničem, a to o stabilním zatížení max. 6,8 kW. Konkrétněji je ostrovní měnič také schopen po dobu jedné minuty pokrýt spotřebu 12 kW, po dobu 5 minut 11 kW a po dobu 30 minut 8,5 kW, dojde-li k překročení stanovené doby nebo zatížení, dochází k přetížení ostrovního měniče s následným vypnutím napájení celé Off-Grid sítě [26]. Předchozí hybridní měnič, který byl zapojen v topologii AC, měl zkratový výkon nižší [1] [14].

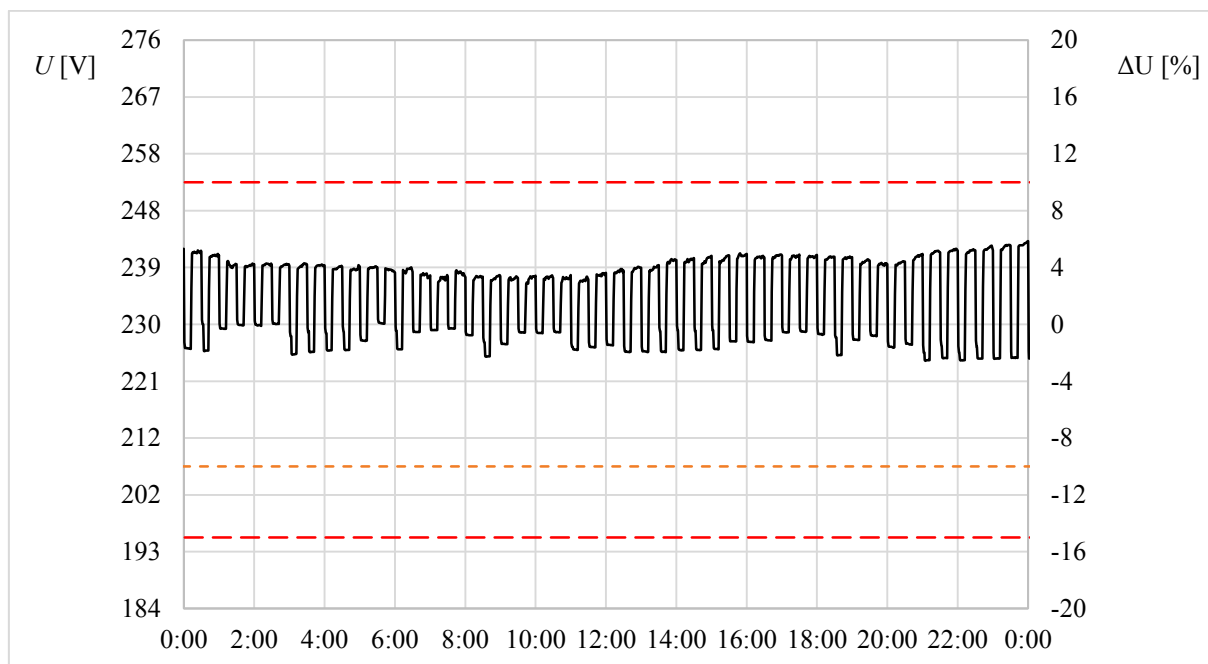
Úpravy v topologii sítě měly za následek stabilizaci základních elektrických veličin. Nyní se již neobjevují fluktuace kmitočtu a napájecí napětí kolísá pouze v závislosti na impedančních poměrech v síti. V tomto případě Off-Grid napájecího systému je zkratový výkon 6,8 kW nebo za určitých časových podmínek i více. Je tedy dán parametry ostrovního měniče a ovlivnění kolísání napětí je v přímé souvislosti se spínáním jednotlivých spotřebičů. Velikost změny impedance v síti pak ovlivní i časovou změnu napájecího napětí. Není tedy vhodné systém zatěžovat nadměrnými impedančními výkyvy.

Také vůči harmonickému zkreslení je systém málo rezistentní. Je to opět dáno zkratovým výkonem sítě a absencí filtračních nebo stabilizačních prvků v síti, které jsou zejména z investičních důvodů nákladné a tím nevhodné. Analýzy kvality elektrické energie ukázaly, že systém je schopen pracovat autonomně, a to bez ztráty kvality elektrické energie, avšak za předpokladu, že bude zvolena pouze omezená skladba spotřebičů. Nelze spínat dohromady zařízení, která mají vysoký příkon, blízkí se maximálnímu výkonu ostrovního měniče. Také opakované spínání takové zátěže za sebou ve krátkých časových intervalech je nežádoucí. Stejně tak, je nepřijatelné, aby byly v součinnosti zařízení, která generují rušivé THD. Jelikož je všechen tok energie přes ostrovní měnič, výsledné parametry sítě jsou dány právě ostrovním měničem Conext XW+ 8548. V blízkosti pracovního bodu ostrovního měniče nepůsobí THD na celkovou síť kriticky. Pokud je však ostrovní měnič zatížen např. pod 20 % svého nominálního zatížení, mohou se výrazně měnit parametry v síti. Pro detailnější parametry OM viz [27]. V následující kapitole je probírán návrh nového kategorizování spotřebičů, který má mít za následek blokování takových kombinací spotřebičů, aby nedocházelo k překročení limitů kvality elektrické energie, anebo pouze po normami stanovený čas. Výše zmiňované hypotézy se potvrdily měřením a vyhodnocováním různých stavů sítě. Jelikož se jedná o rozsáhlé analýzy PQ, které obsahují velké množství dat a grafů, neboť se jedná zpravidla o dlouhodobá měření, je v této DP zmíněna pouze ukázka vyhodnocování PPQ. V níže uvedených grafech je interpretace charakteristických stavů PPQ, které jsou na pracovišti Hard běžné, když je systém v režimu Off-Grid. Frekvence je téměř bez jakýchkoliv vyšších fluktuací dodržena v rámci rozsahu  $\pm 0,2$  %, přičemž normativní limit jsou 2 % po dobu 95 % z vybraného týdenního okna. Samozřejmě je zde ještě rezerva, která povoluje po dobu 5 % z vybraného týdenního okna kolísání  $\pm 15$  %, detailněji viz kap. 1.1.



obr. 30 Ukázka z vyhodnocování fluktuace frekvence na pracovišti Hard

Ukázky grafů s vyhodnocením PPQ jsou zde uvedeny v závislosti na čase, neboť právě ten je dalším důležitým parametrem při vyhodnocování PQ. Pokud nastane nežádoucí stav, kdy nejsou PPQ ve svých kvalitativních limitech, právě onen čas překročení limitu dodá informaci, která je nutná pro zpětné dohledání v databázi spínání spotřeby. Každý spotřebič nebo kombinace spotřebičů má svůj identifikační kód (Id), který je přiřazen po dobu jejich připojení. Elektrické napětí je také bez jakýchkoliv vyšších fluktuací v rámci rozsahu  $+6\%$  /  $-3\%$ , přičemž normativní limit je  $\pm 10\%$  po dobu 95 % z vybraného týdenního okna. Samozřejmě je zde také ještě rezerva, která povoluje po dobu 5 % z vybraného týdenního okna kolísání  $+10\%$  /  $-15\%$ , detailněji viz kap. 1.1.

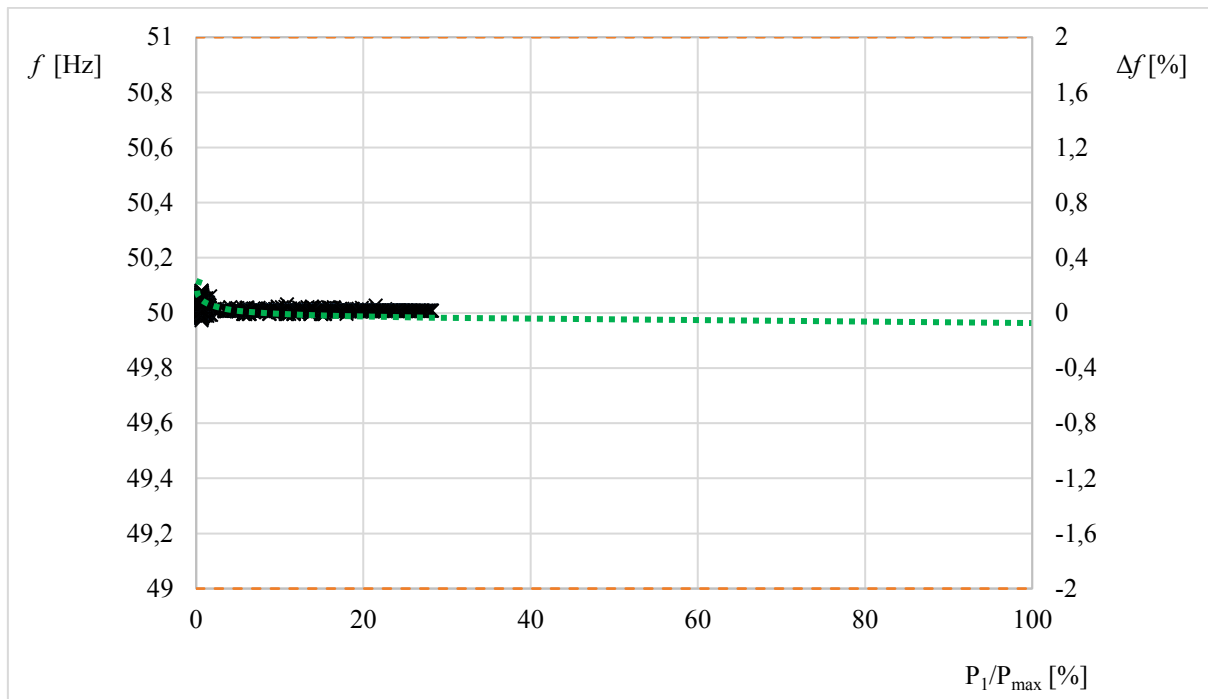


obr. 31 Ukázka z vyhodnocování kolísání napětí na pracovišti Hard

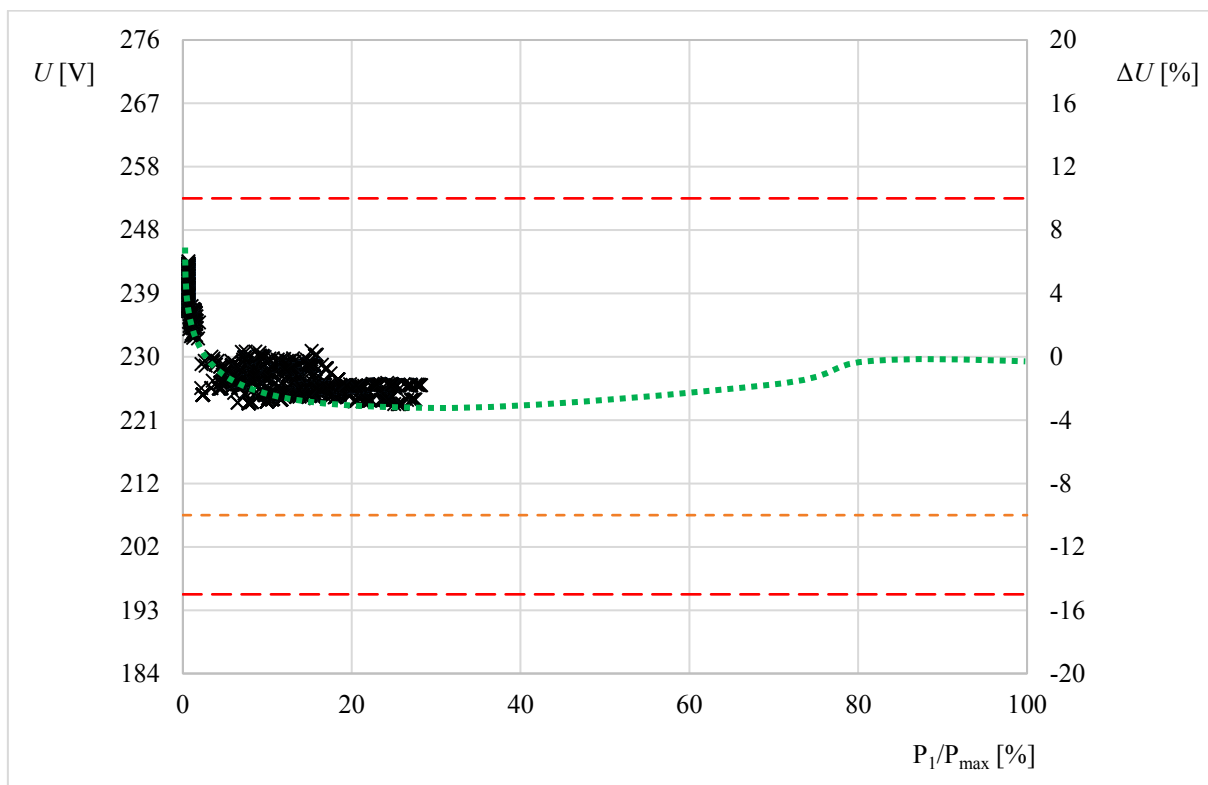
Jako další příklad je zde uveden činitel harmonického zkreslení napětí, který zahrnuje až 40. harmonickou. Spektrální analýza napětí je tedy až do 2 kHz. Pokud se dodrží určitá kombinace spotřebičů, dosahuje max. kolísání tohoto harmonického zkreslení napětí do 7 %, přičemž normativní limit je 8 % po dobu 95 % z vybraného týdenního okna. Tento činitel harmonického zkreslení napětí může být po dobu 5 % z vybraného týdenního okna, být i vyšší, detailněji viz kap. 1.1. Samozřejmě se však jedná o nežádoucí jev zpětných vlivů na síť vlivem připojení určitého spotřebiče nebo kombinace spotřebičů. Ten ovlivňuje tvar sinusoidy elektrického napětí, a tím může ovlivnit i funkci zařízení nebo spotřebičů, které obsahují např. elektronické obvody.

Pro porovnání je v grafu také velikost harmonického kreslení proudu. Ten je v rámci norem bez jakýchkoliv limitů. Problémy s harmonickým zkreslením proudu nebo napětí jsou na pracovišti Hard při zatěžování ostrovního měniče mimo jeho pracovní oblast. Na toto téma bylo sepsán publikační článek [28], který popisuje jednotlivé stavy při změně zatěžování ostrovního měniče. Na obr. 35 je vyhotovený graf, který vychází ze stejného časového období jako analýza v článku, a proto je pro jeho podobnost uveden i citační zdroj [28]. Naměřené data sloužily pro vyhodnocení charakteristik pro harmonické zkreslení, chyběly tak data pro změny napětí, kmitočtu nebo míry flikru. V současnosti je však Off-Grid systém v oblasti akumulace el. energie oslaben absencí tří baterií. Nominální napětí je tak o 3,6 V DC sniženo a při zatížení ostrovního měniče nad 30 % nejsou naměřené data relevantní

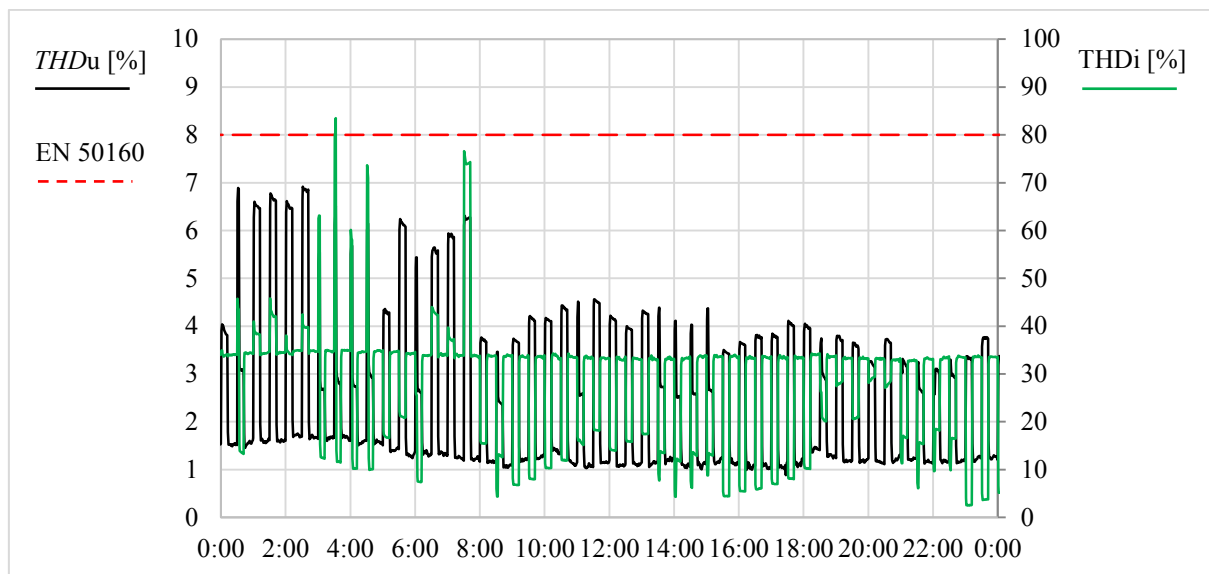
a v krátké době také docházejí k odpojení Off-Gridu vlivem pokleslého napájecího napětí na vstupu ostrovního měniče. Tyto měření se musejí zopakovat až po revitalizaci akumulárního systému. Na obr. 32 a obr. 33 jsou načrtnuty zeleně charakteristiky ostrovního měniče vzhledem ke změnám napětí a frekvence s využitím hypotéz a naměřené body do 30 % zatížení ostrovního měniče.



obr. 32 Charakteristika frekvence vzhledem k zatížení ostrovního měniče

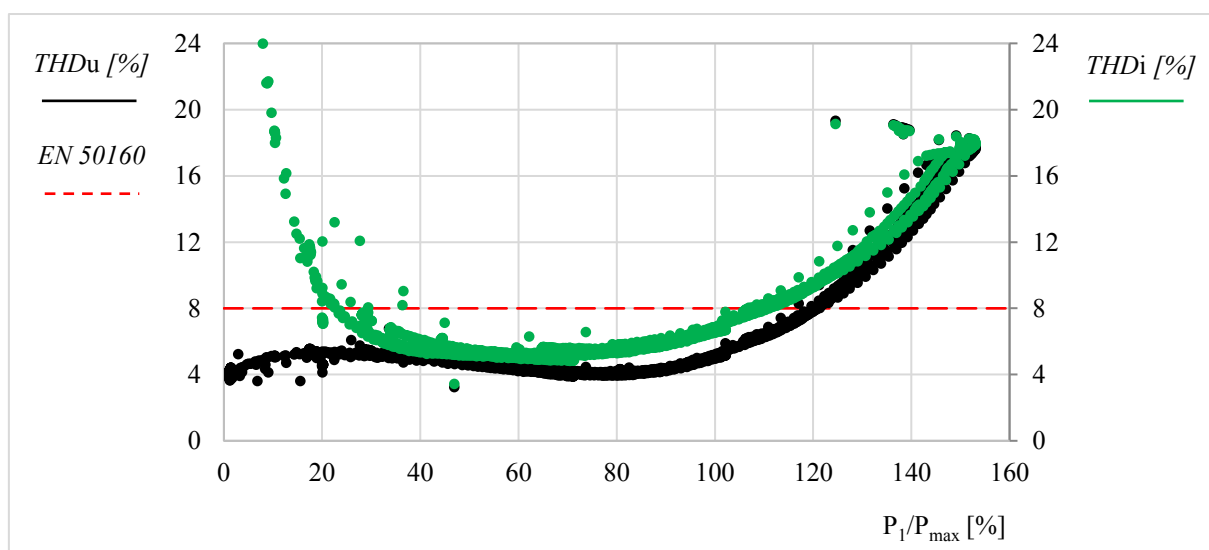


obr. 33 Charakteristika napětí vzhledem k zatížení ostrovního měniče



obr. 34 Ukázka z vyhodnocování THD na pracovišti Hard v závislosti na čase

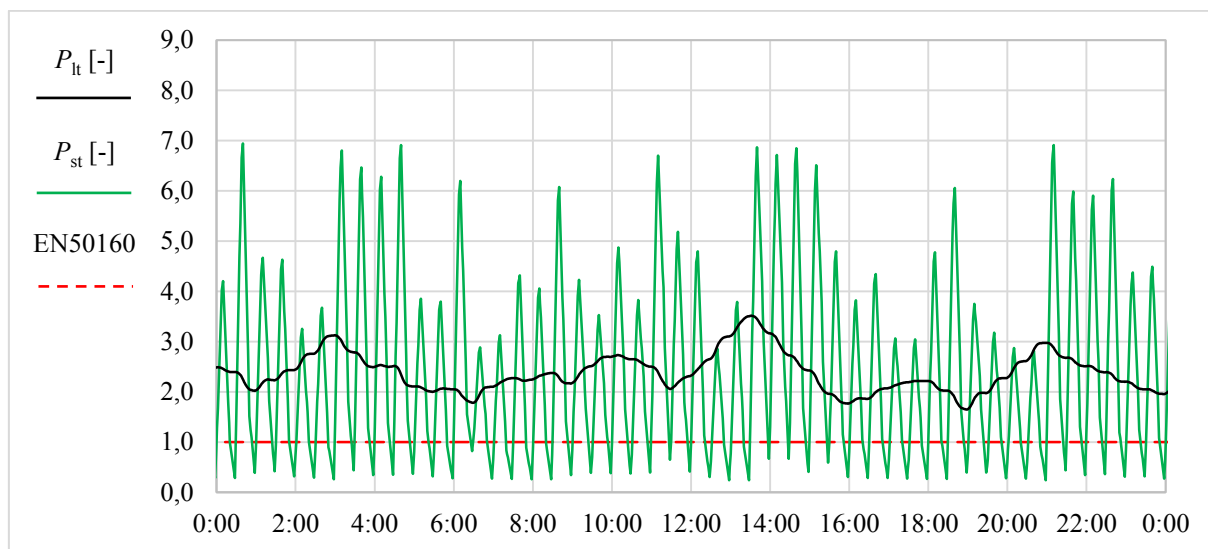
Činitel harmonického zkreslení je závislý zejména na typu spotřebiče z hlediska konstrukce (např. využití tyristorů aj. elektroniky). Ve vybudované platformě Off-Gridu však není spínaný zdroj nebo jiný spotřebič, který by ovlivňoval tento PPQ tak negativně, a přitom měl výkon, kterým zatíží ostrovní měnič např. nad 20 %. Proto je nutné spínat různé kombinace spotřebičů, aby v následných analýzách byla možnost vyhodnocovat i další stavy ostrovního měniče. Možnosti zvýšit zatížení OM jsou však omezené. Dominanta je v tomhle ohledu využití spínání tzv. RLC-zátěže v rozvaděči pro simulování spotřeby (viz kap. 3.2). Ten však nemá prostředky pro vznik THD. Naopak může ostrovnímu měniči dopomoci k lepším výsledkům PQ, avšak za pomoci uměle vyvolaného spotřebiče, což vede k ne hospodárnému provozu sítě. Pro činitele harmonického zkreslení může být zvýšení zátěže v síti odporovým spotřebičem i další možnost optimalizačního opatření. Dodáním proudu do sítě bez harmonického zkreslení celkové THDi klesá. Proto je vhodné se spotřebiči, které dodávají vyšší harmonické proudy do sítě, spínat i další RLC zátěže (např. bojler), aby OM pracoval v oblasti svého pracovního bodu.



obr. 35 Vyhodnocení THD na pracovišti Hard v závislosti na zatížení ostrovního měniče [28]



Vybraný den, který je na ukázkách z vyhodnocení PQ, tvoří příklad vyhodnocení kvůli své skladbě připojených spotřebičů během celého dne. Jedná se o nepřetržité spínání unikátní trojice spotřebičů po 12 minutách s 18minutovými pauzami. Celkově se jednalo o 119 kombinací spotřebičů, které jsou ve výše zmiňovaných intervalech spínány a odepínány ze sítě po dobu tří dnů. Tento typ spínání spotřeby je vhodný pro sledování extrémních stavů v síti a může do určité míry usnadnit potvrzení hypotéz v oblasti vyhodnocování PQ. Nakonec byl vyselektován pouze jeden den, neboť chování sítě v dalším období bylo podobné a interpretace takových dat by vedle pouze k duplicitním závěrům.



obr. 36 Ukázka z vyhodnocování míry flikru na pracovišti Hard v závislosti na čase

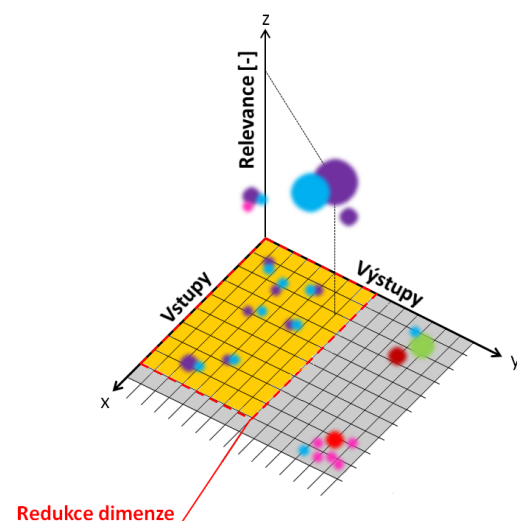
Na obr. 36 je ukázka z vyhodnocení dlouhodobé i krátkodobé míry flikru. Jelikož byla nastavená sekvence spínání spotřebičů ve výše zmiňované konfiguraci, dlouhodobá míra flikru je mimo normativní limit, který je určen do velikosti 1 po dobu 95 % z vybraného týdenního okna. Dlouhodobá míra flikru může po dobu 5 % z vybraného týdenního okna, být i vyšší, detailněji viz kap. 1.1. Ke krátkodobé míře flikru zatím normy, stejně jako u THD<sub>i</sub>, neuvádějí limit.

Momentálně probíhá kontinuální sběr dat, pro následné vyhodnocení aktuálního stavu kvality elektrické energie v testovací platformě Off-Grid napájecího systému, PQA monitorovacím zařízením SMC144 od společnosti KMB. Pro další a komfortnější analýzy může také sloužit doplňující segment PQ, který se implementuje do stávajícího monitorovacího systému s využitím Labview. Tato DP může být podkladem pro realizaci takové úpravy SW, který je momentálně pouze zaměřen na monitoring elektrických a meteorologických veličin (viz obr. 21).

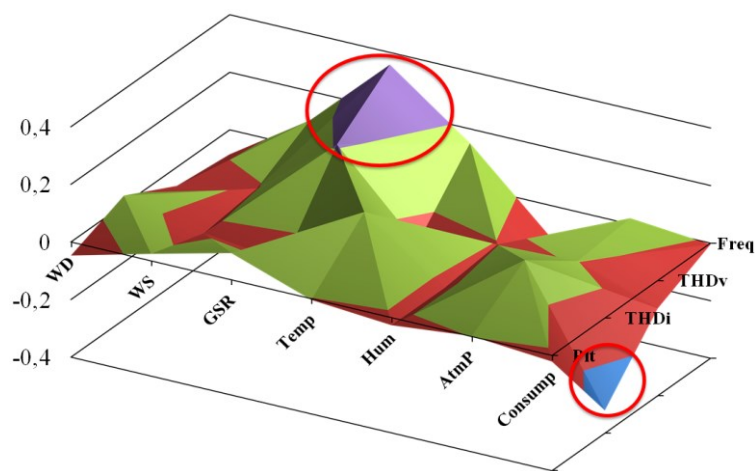
Vyhodnocování aktuálního stavu PQ se v současné době na pracovišti Hardu provádí tabulkovým procesorem MS Excel. Metodika vyhodnocování PQ se v posledních analýzách ustálila na sledování kvalitativních parametrů jako jsou změny napětí, frekvence, flikru a harmonického zkreslení v závislosti na čase vs. poměrný výkon (okamžitý odebíraný výkon/zkratový výkon sítě), který je také spjat s časem v jednom grafu. Tyto údaje následně slouží pro snadné vyhodnocování stavů sítě. Všem těmto procedurám pro vyhodnocování však předcházely jiné odborné analýzy, které měly za úkol najít největší vztahy, vazby nebo souvislosti mezi veličinami, které jsou na pracovišti Hardu zaznamenávány. V minulých pracích studentů byly např. analýzy a korelace s využitím tzv. Kohonenových map (obr. 38), které byly využity pro prediktivní modely. [29] [30]



Cílem těchto korelací je nalézt největší relevance mezi veličinami. Vstupem pro takovou analýzu byly meteorologické veličiny a zatížení sítě. Výstupem parametry kvality elektrické energie. Optimalizační algoritmus vytvoří tzv. shluky a vyřadí veličiny, které spolu nijak nesouvisí nebo je jejich vazba zanedbatelná. Tomuto procesu se říká redukce dimenze. Dalším krokem algoritmu je nalézt největší relevance daných veličin. Takovýto proces je pro představu načrtnut v trojrozměrném grafu na obr. 37. Výstupem celého procesu algoritmu je určení konkrétních relevancí parametrů kvality elektrické energie, které mohou dopomoci pro vybudování prediktivních nástrojů, jež mohou být součástí bloku pro celkovou optimalizaci sítě s využitím OZE. Na obr. 38 lze vidět reálnou korelační analýzu mezi meteorologickými a kvalitativními parametry s využitím Kohonenových map [31]. Mezi meteorologickými veličinami jsou směr větru (WD), rychlost větru (WS), úhrn slunečního svitu (GSR), teplota (Temp), vlhkost (Hum) a atmosférický tlak (AtmP). Mezi elektrické veličiny patřily spotřeba (Consump), flikr, harmonické zkreslení a frekvence. Vyhodnocení přineslo výsledky o největším ovlivnění ve vazbách s úhrnem slunečního svitu, teplotou a fluktuací frekvence. Zároveň také, že meteorologické veličiny nesouvisí s THD. [30]



obr. 37 Princip korelační analýzy



obr. 38 Reálná korelační analýza mezi meteorologickými a kvalitativními parametry s využitím Kohonenových map [31]

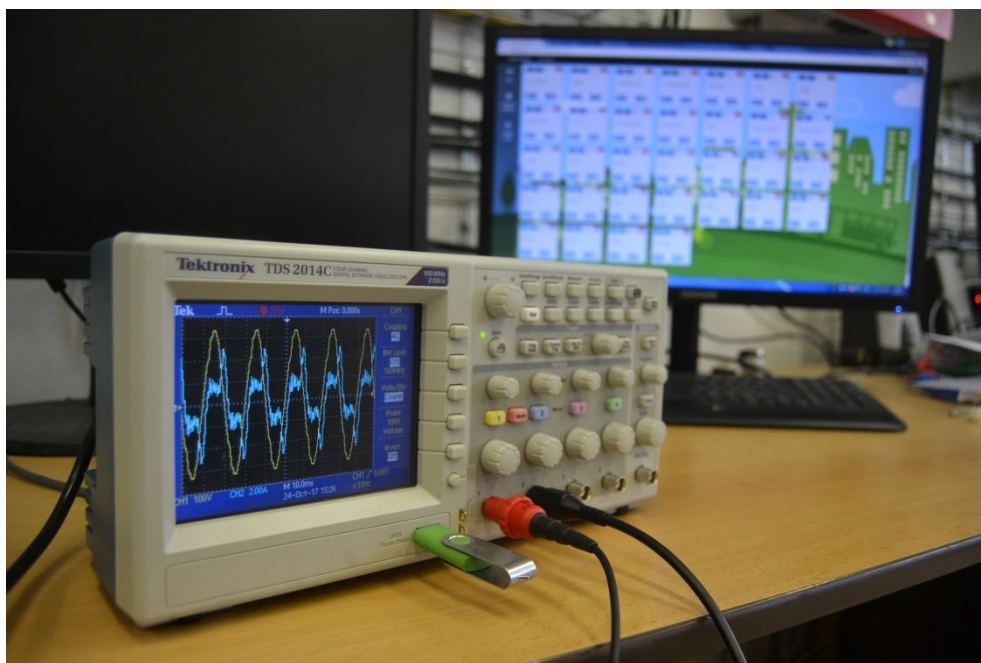
### 3 Kategorizace spotřebičů

Jelikož popisovaný Off-Grid systém využívá zdroje elektrické energie s nestabilní dodávkou elektrické energie, jsou kladen vysoké nároky na jeho řídicí systém. Řídicí systém musí s maximální možnou účinností zajistit akumulaci dostatečného množství elektrické energie k pokrytí předpokládané spotřeby, ale také musí být schopen pomoci předdefinovaných priorit řídit spotřebu elektrické energie s tím, že spotřeba elektrické energie je rozdělena do několika kategorií dle možnosti časového posunu. V minulosti byly tyto kategorie zmiňovány pouze v souvislosti s energeticky soběstačným systémem. Taková kategorizace spotřebičů byla provedena dle analýz spotřeby elektrické energie např. i zde [32]. První kategorie byla vytvořena pro spotřebiče, jejichž provoz je trvalý a spotřebovávají elektrickou energii v průběhu celého dne, další kategorií tvořily spotřebiče (např. pračka, myčka), jejichž provoz se dá odložit na období, kdy lze předpokládat dobré podmínky pro výrobu elektrické energie z hybridních zdrojů elektrické energie. Třetí skupinu tvořily spotřebiče, jejichž provoz je závislý na vůli provozovatele, jedná se například o televizor, počítač. [18]

Tato kapitola se zabývá konkrétními zařízeními, které aktivně využívají jako zdroj testovací platformu Off-Grid napájecího systému na Hardu. Součástí je celková bilance relevantních parametrů spotřebičů, včetně možnosti jejich nasimulování díky rozvaděči pro simulování zátěže. Závěr kapitoly je věnován vlastnímu návrhu kategorizace spotřebičů, který je aplikován na pracoviště Hardu.

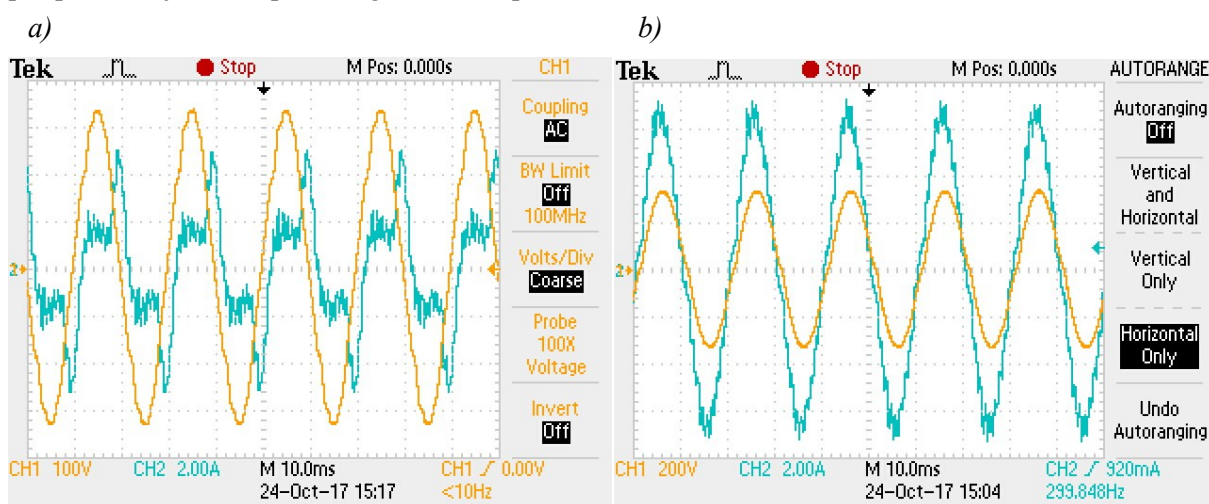
#### 3.1 Přehled spotřebičů v napájecím systému

Pro získání potřebných parametrů a celkové bilance spotřebičů bylo provedeno několik měření, ze kterých byly získány informace o kvalitativních parametrech spotřebičů. Ověřovalo se také jejich ovlivnění v různých stavech sítě i jejich skutečný odběr. K těmto měření posloužily měřicí přístroje a SW, které jsou součástí vybudované platformy pro online monitoring (SMC144, Conext Combox) a také osciloskop Tektronix TDS 2014C.



obr. 39 Ukázka z měření: sepnutí mikrovlnky – osciloskop Tektronix TDS 2014C

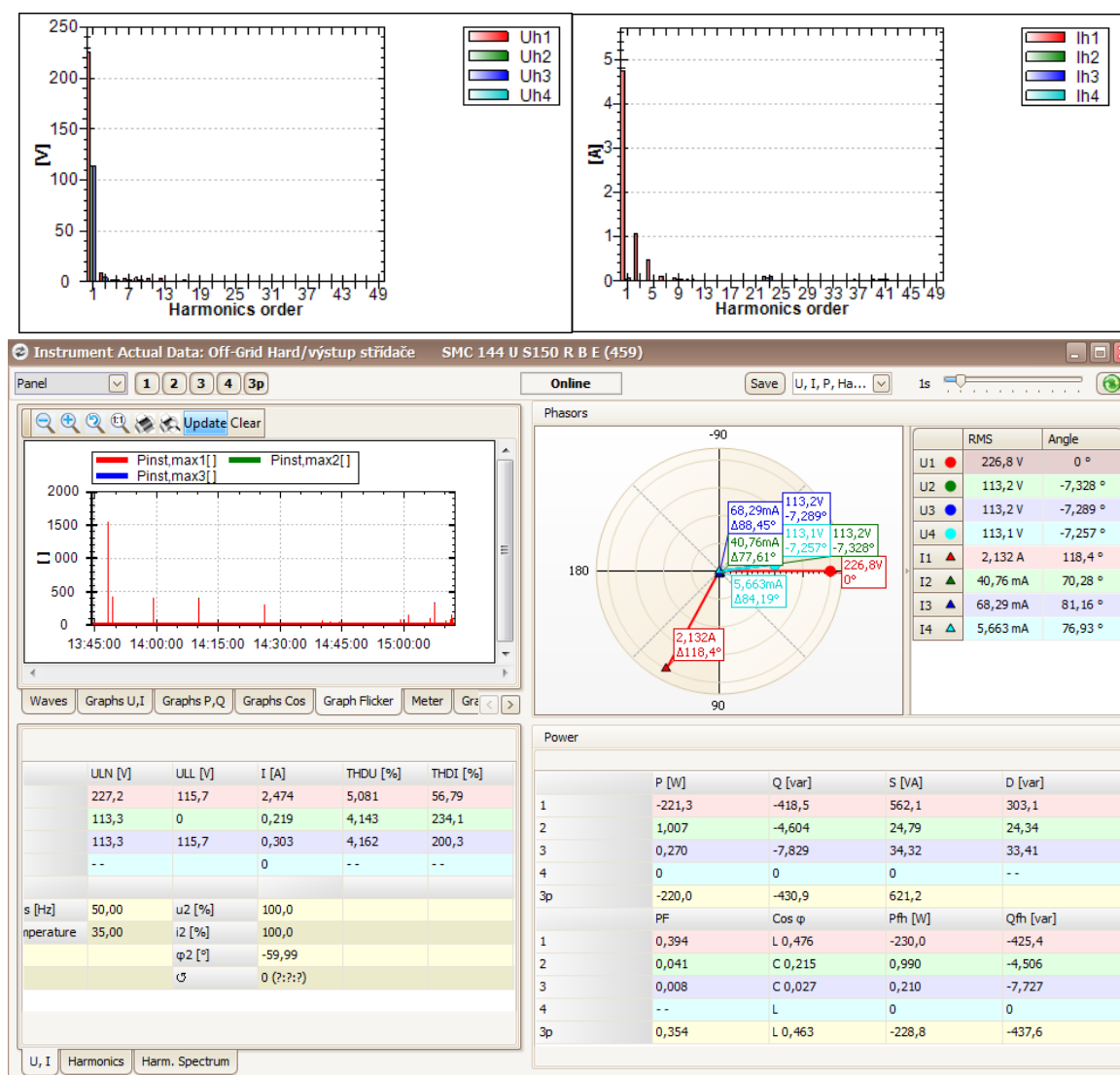
Testovací platforma Off-Grid napájecího systému má simulovat běžnou domácnost. To znamená, že by se v ní měly testovat také vzájemné interference typických spotřebičů, jež jsou zastoupeny v běžné rodinné domě. V současné době reprezentují tyto spotřebiče lednička, klimatizace, bojler, rychlovarná konvice, svítidla, LCD televize a mikrovlnka. Samozřejmě, že většina domácností má bohatší skladbu spotřebičů, ale pro typické chování testovací platformy lze použít výše zmiňované nebo využít ještě rozvaděč pro simulování spotřeby viz kap. 3.2. Všechny tyto spotřebiče zatěžují testovací napájecí systém jiným způsobem, protože jejich parametry jsou rozdílné. Pro laickou veřejnost je oblíbeným sledovaným elektrickým parametrem zejména elektrický výkon daného zařízení. Bývá také zpravidla uveden na štítku příslušného zařízení společně s ostatními údaji jako je napájecí napětí, frekvence, výrobní číslo atp. Parametry, které však výrobci neudávají jsou ty, kterými se tato práce zabývá nejvíce – těmi kvalitativními. Jakým způsobem dané zařízení ovlivňuje síť? Na tuto otázku lze odpovědět pouze do určité míry. Každá síť má zpravidla jiné parametry, obzvláště pokud má různé zdroje elektrické energie. Také s přibývajícím počtem spotřebičů roste i množství jejich kombinací, ve kterých je lze zapojit. Různé spotřebiče se mohou mezi sebou různě ovlivňovat, stejně jako mohou různě ovlivňovat síť. V některých případech může i např. spotřebič, který má odporovou zátěž, dopomoci k lepším kvalitativním výsledkům sítě, pokud se připojí v kombinaci se zařízením, které vykazuje vysoké THD do sítě, jeli připojeno samostatně. Jedná se tedy o složitý proces posuzování kvalitativních parametrů elektrické energie, pokud vyžadujeme deterministické relevantní výsledky. Nelze vyhodnotit přesné zpětné vlivy na síť, pokud budou jednotlivé spotřebiče připojeny po určitou dobu na síť a nebudou vyhodnoceny také jiné varianty kombinací jako např. lednička s mikrovlnkou, lednička se svítidly atp. Další možností je kategorizovat spotřebič s určitou nepřesností. Vyhodnotit vazby mezi spotřebiči s využitím hypotéz. Pokud je v napájecím systému omezené množství spotřebičů, lze provést i tuto metodu. Nutností je však mít přehled o základních vlastnostech a parametrech daného zařízení. Jedná se, jak o elektrické veličiny ze štítku zařízení, tak o uspořádání komponentů uvnitř daného zařízení. Typickým příkladem je rychlovarná konvice, která je zástupcem odporového spotřebiče, jenž má výkon v řádech  $10^3$  W a nemá v sobě elektronické obvody s použitím např. tyristorů, které negativně ovlivňují THD. Výhodou této procedury je hlavně flexibilita při dalších změnách ve spotřebičové skladbě a absence dlouhodobého měření s následným vyhodnocením, které přináší vstupní parametry pro podrobnější koncepcie kategorizování spotřebičů.



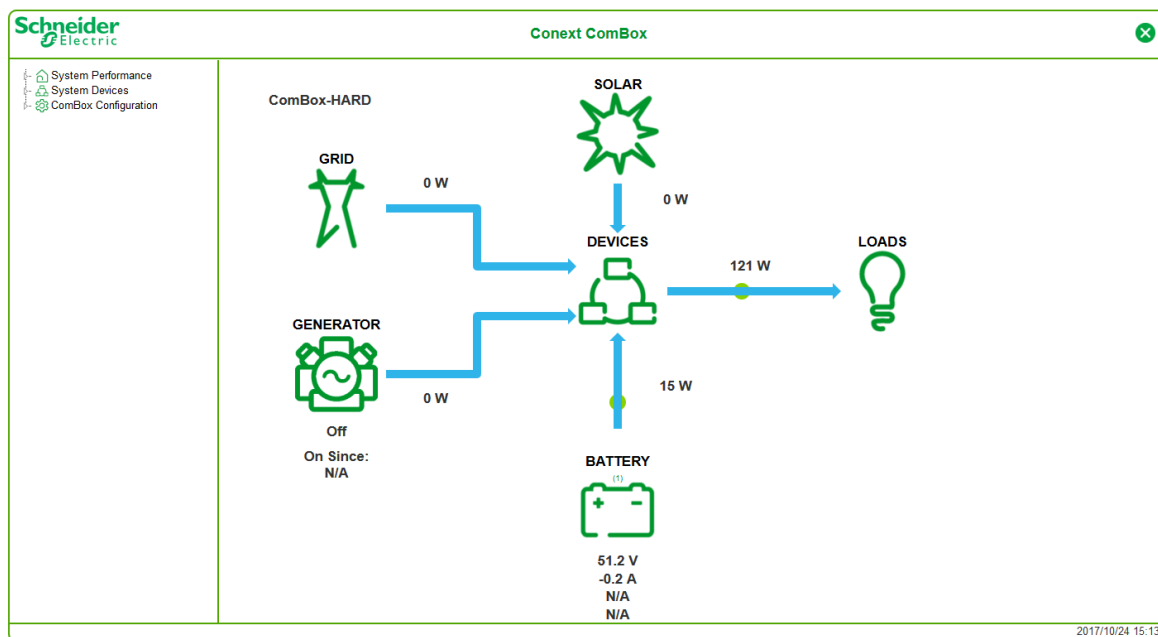
obr. 40 Ukázka z měření – průběh napětí a proudu při připojení  
a) mikrovlnky b) rychlovarné konvice

## Kategorizace spotřebičů

Na obr. 40 lze vidět ukázkou z osciloskopického měření dvou odlišných zařízení. Jednalo se o mikrovlnku a rychlovarnou konvici. Na pravé části obrázku lze vidět, že napětí a proud je ve fázi, čili nemá fázový posun mezi napětím a proudem, neboť napětí prochází nulou právě ve stejnou chvíli jako proud. Harmonické zkreslení bylo proti mikrovlnce, kterou lze vidět v levé části, zanedbatelné. Ke konkrétním výsledkům je však nutné využít SMC144 s aplikací ENVIS. Na obr. 41 lze vidět tuto podrobnější analýzu PQ s využitím SW nástroje ENVIS, který vyhodnocuje DAQ z SMC144. Jedná se o podrobnější naměřená data, kdy byla v testovací platformě sepnutá pouze mikrovlnka. To znamená stav, kdy byl Off-Grid zatížen přibližně 120 W, což s ohledem na maximální výkon ostrovního měniče, který je 6 800 W (detailněji viz [27] nebo kap. 2.1), jsou přibližně 2 % zatížení sítě. Odběr lze monitorovat také z aplikace Conext ComBox viz obr. 42. Vzhledem k vlastnostem ostrovního měniče, který nemá optimální regulaci na tyto stavy mimo nominální zatížení, je harmonické zkreslení mimo normou stanovenou mez. Těmto stavům by se dalo předejít připojením další odporové zátěže, aby se zvýšil podíl proudu bez harmonického zkreslení, a zároveň byl ostrovní měnič zatížen do stavu blízko svého pracovního bodu. Skladbu spotřebičů v testovací platformě reprezentuje obr. 43, a to bez rozvaděče pro simulování spotřeby, který je součástí následující kap. 3.2.



obr. 41 Ukázka z měření: sepnutí mikrovlnky – ENVIS



obr. 42 Ukázka z měření: sepnutí mikrovlnky – Conext ComBox



obr. 43 Skladba spotřebičů v testovací platformě: 1) klimatizace 2) zářivkové svítidlo (9x) 3) bojler 4) rychlovarná konvice 5) mikrovlnka 6) lednička 7) LCD TV



### 3.2 Simulace spotřeby (RŘS)

V minulosti byl zhotoven unikátní rozvaděč pro simulování spotřebičů, které v Off-Grid systému chybí. Jedná se o kombinované spínání odporů, tlumivek a kondenzátorů ve vhodně zadané konfiguraci. Rozvaděč obsahuje také řídicí jednotky, které vhodně spínají relé podle vzdáleného požadavku (uživatel/ADSM). Pomocné kontakty jednotlivých relé spínají vyžádaný charakter spotřebiče. Tímto způsobem lze efektivně doplnit spotřebiče i s jejich charakteristickým účínkem. Po nakonfigurování parametrů zátěže v RŘS je v databázi evidován tzv. spotřebič RLC-zátěž. Rozvaděč se samozřejmě může také přehřívat, neboť obsahuje zejména odporníky, a proto je součástí výzbroje také termostat, který vhodně spíná dva ventilátory pro odvod nežádoucího tepla z rozvaděče. Celá výzbroj rozvaděče RŘZ je k nahlédnutí v příloze. Rozvaděč je zapojen ze dvou přívodů. První přívod je rozvaděče REM1, konkrétněji z AC svorkovnice Off-Grid napájecího systému, a slouží pro napájení odporů, tlumivek a kondenzátorů. Čili přívod z Off-Gridu slouží jako přívodní kabel pro simulovanou spotřebu, zatímco druhý přívodní kabel z R1, který je z AC svorkovnice On-Gridu, a je zapojen na bezpečnostní a ovládací prvky v rozvaděči. To znamená, že z běžné distribuční sítě je napájeno aktivní chlazení, termostat a řídicí jednotky (CU) se svými PSU.

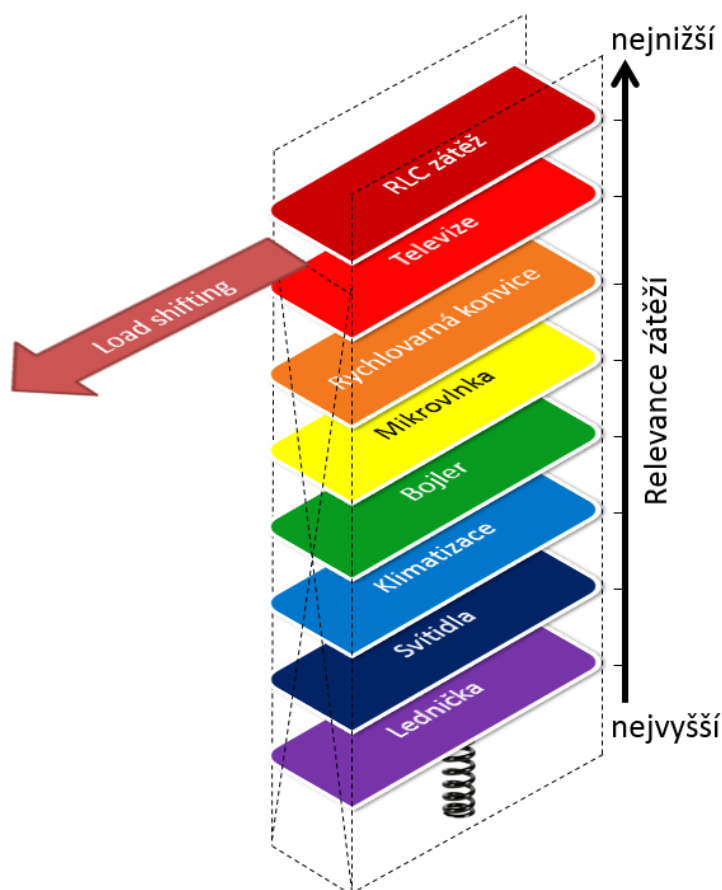
### 3.3 Kategorizování spotřebičů

Způsobem měření a vyhodnocení, který je popsán v kap. 3.1, byla sestavena tab. 6, jež je výsledkem této kapitoly o návrhu kategorizace spotřebičů na Hardu. Do současnosti nejsou implementována zařízení, která by se připojovala na DC přípojnice. Všechny spotřebiče jsou připojovány na AC přípojnicí (230 V, 50 Hz). Mezi další vize testovací platformy patří i výměna zářivkových svítidel za svítidla s využitím technologie LED, která budou napájena přímo z DC přípojnice. Navrhované kategorie jsou tři – důležitá, méně důležitá a nedůležitá zařízení. Jedná se o koncepci kategorizace spotřebičů spjatou s každodenní rutinou na pracovišti Hard, která se nemění po celý rok. Vyšší úroveň koncepce kategorizování spotřeby by bylo vytvoření platformy pro adaptibilní kategorizování spotřebičů i po modifikaci skladby zařízení. Tento způsob adaptivního kategorizování by byl vhodný vytvořit až po verifikaci stávajících návrhů dlouhodobým měřením. Pro detailnější optimalizace je nutné mít všechny důležité parametry, které často získáváme právě dlouhodobým měřením, což může být složitý a dlouhý proces, a proto je vhodné prvotně kategorizování navrhnout s částečným využitím hypotéz. Dlouhodobým měřením lze následně kategorizování doladit. Posledním spotřebičem v tabulce je tzv. RLC-zátěž, která se spíná v rozvaděči pro simulaci spotřeby, více v kap. 3.2.

**tab. 6** Kategorizace spotřebičů v testovací platformě Off-Gridu

Zařízení	P [W]	Negativní vliv	Návrh kategorie
Lednička	190	-	Důležité
Svítidla	160	THD	Důležité
Klimatizace	1800	$\Delta U$	Méně důležité
Bojler	600	$\Delta U$	Méně důležité
Rychlovarná konvice	1130	$\Delta U$	Nedůležité
LCD televize	240	THD	Nedůležité
Mikrovlnka	120	Vysoké THD	Nedůležité
RLC-zátěž	-	-	Nedůležité

Po určení kategorií je nutné také uvést určitou důležitost, tedy relevanci jednotlivých spotřebičů. Na obr. 44 je naznačen „zásobník“ se všemi spotřebiči, které se spínají v Off-Grid napájecím systému. Tento obrázek také intuitivně naznačuje relevance jednotlivých spotřebičů. Hlavní myšlenkou optimalizací příčiny problémů spojené s kvalitou el. energie nebo i jejím nedostatkem je posouvání spotřeby (viz kap. 1.3.2.2). Pokud by ADSM v součinnosti s prediktivními nástroji vyhodnotil budoucí spotřebu jako neuskutečnitelnou z důvodu nedostatku energií nebo problémům s PQ, musí „zkusit“ odpojit některý ze spotřebičů a provést iterační výpočty. Odpojí nebo přesune na jiný čas právě ten spotřebič, který má nejnížší relevanci. Kategorizování spotřebičů se může podle aplikace na různé typy objektů lišit. Některé aplikace jsou pro rodinné domy, tam bude priorita zaměřena podobně jako je v koncepci tab. 6. Zatímco u rozsáhlejších aplikací, které mohou být zaměřeny např. i na drobnou výrobu, mohou být důležitější jiné druhy zařízení, než je lednička nebo svítidla, ale např. výrobní stroj. Vše také souvisí se systémem UPS, který může být v takovém objektu jinak řešen, než je tomu u testovací platformy rodinného domu.

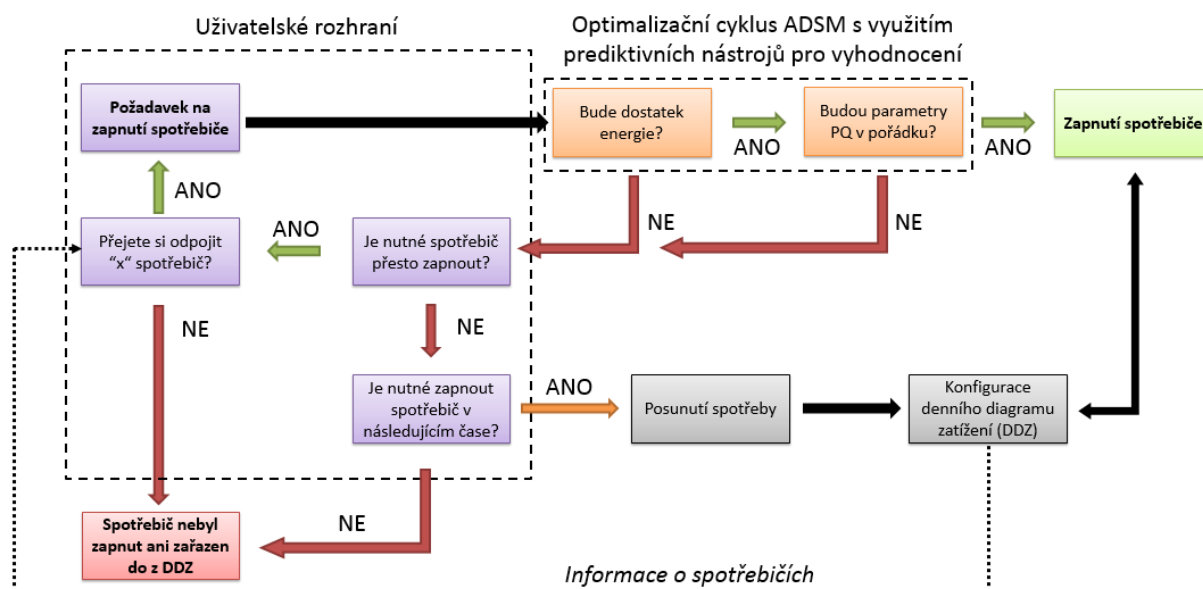


obr. 44 Grafické určení relevancí v návaznosti na posouvání spotřeby

## 4 Koncepte algoritmu pro optimalizaci PQ v Off-Grid systému

Celá koncepce optimalizačních opatření kvality elektrické energie slouží jako podklad pro realizaci jednoho z bloků celkové optimalizace sítě, jenž řeší energie. Optimalizovaná síť musí být energeticky soběstačná a energeticky spolehlivá. Tyto dva primární atributy reprezentují oranžové bloky na obr. 45. Jedná se o bloky, které spadají do tzv. optimalizačního cyklu pro aktivní řízení spotřeby, jenž využívají také prediktivních nástrojů (viz kap. 4.2).

Jelikož se jedná o koncepci pro rodinný dům, musí existovat také určité uživatelské rozhraní. V tomto rozhraní se uživatel rozhoduje, zdali chce některý ze spotřebičů zapnout. Pokud by mohly vzniknout problémy s nedostatkem energie nebo zhoršením kvality elektrické energie mimo normou stanovené meze, může uživatel rozhodnout, zda odpojit spotřebič s nejmenší důležitostí (spotřebič “x”), a tím získá možnost připojit požadovaný spotřebič ihned, anebo v opačném případě jej zařadit do tzv. denního diagramu zatížení. Samozřejmě, že algoritmus musí provést určitý počet iteračních kroků, aby zjistil, který spotřebič nebo spotřebiče je nutné odpojit. K těmto výpočtům také přibývají další opakovaná měření veličin z online monitoringu, včetně dalších opakovaných výpočtů neustálého monitoringu kvality elektrické energie, neboť je nutné také sledovat délku poruch PPQ. Černé šipky značí povel nebo vazbu, která ovlivňuje daný blok. Celá koncepce aktivního řízení spoléhá na využití prediktivních nástrojů s akčním zásahem vhodně posunuté spotřeby takovým způsobem, aby byl výkon spotřebičů spotřebováván co nejefektivněji, a to s co největším komfortem pro domácnost, který zajišťují kategorizované spotřebiče. Vypnutí spotřebiče uživatelem schéma neřeší, neboť se pouze upraví konfigurace denního diagramu, který se neustále verifikuje monitorováním sítě, jež je součástí ADSM.

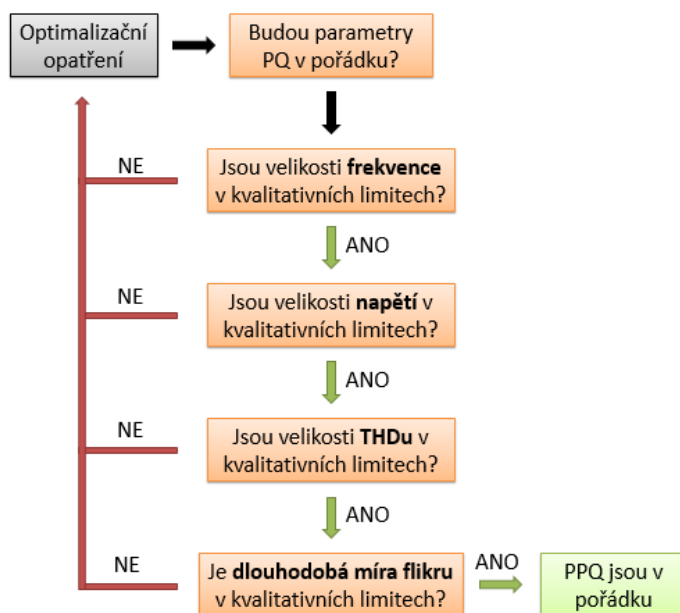


obr. 45 Obecný přehled funkce algoritmu pro optimalizaci sítě



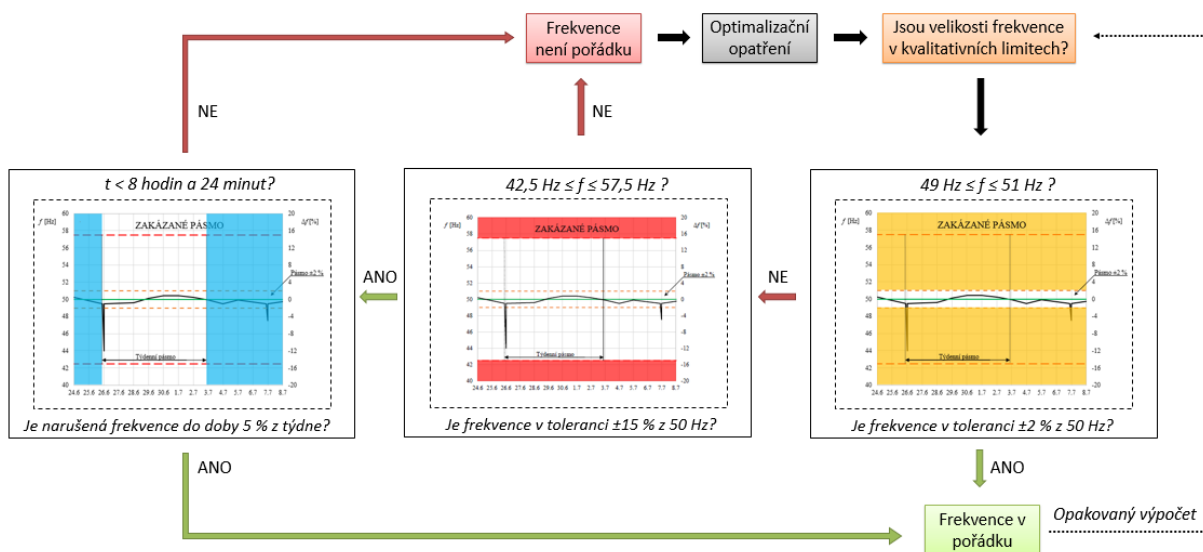
## 4.1 Vývojové diagramy pro stanovení limitů kvality elektrické energie

Tato kapitola skládá legislativní předpisy z kap. 1.1 o limitech parametrů kvality elektrické energie. Jedná se o selekci relevantních PPQ s vytvořením jednotlivých bloků algoritmů, které se budou ve výsledku implementovat do jednoho celého bloku. V koncepci optimalizace Off-Grid sítě se z hlediska kvality elektrické energie vychází mj. i z toho, že je napájecí systém jednofázový, a tedy že není nutné vyhodnocovat nesymetrii. Také přerušení nebo podpětí a jiné parametry, o kterých je kap. 1.1, není nutné v koncepci algoritmu pro testovací platformu Off-Gridu zahrnovat. Jedná se spíše o stavové veličiny, které může systém monitoringu oznamovat, ale ne s nimi kooperovat. Návrh je zaměřen na změny frekvence, napětí, harmonické zkreslení napětí a dlouhodobou míru flikru viz obr. 46.

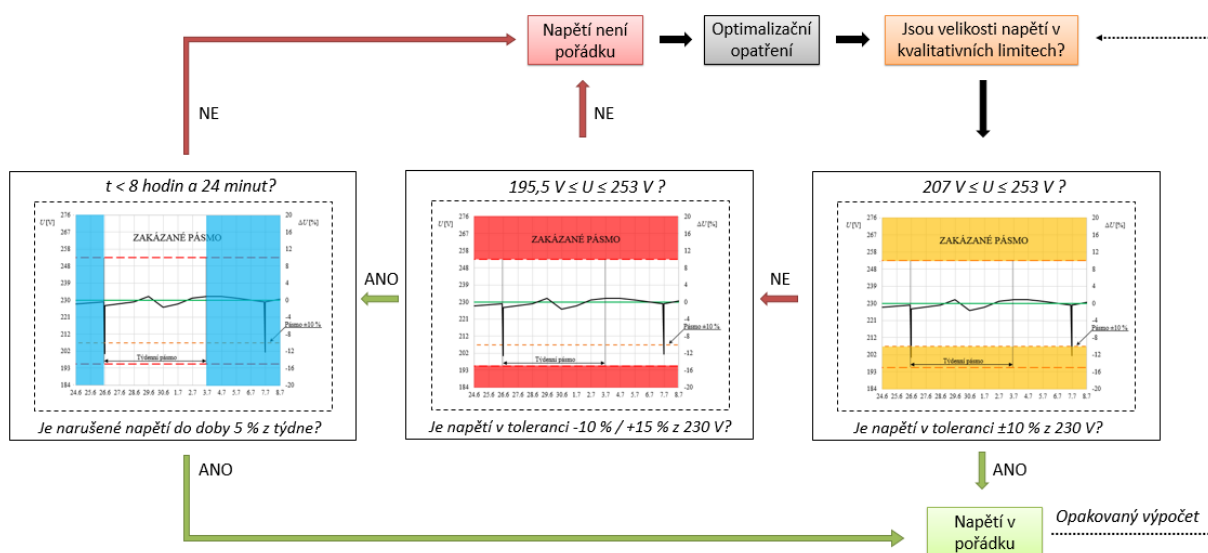


obr. 46 Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace PPQ mimo normou stanovenou mez

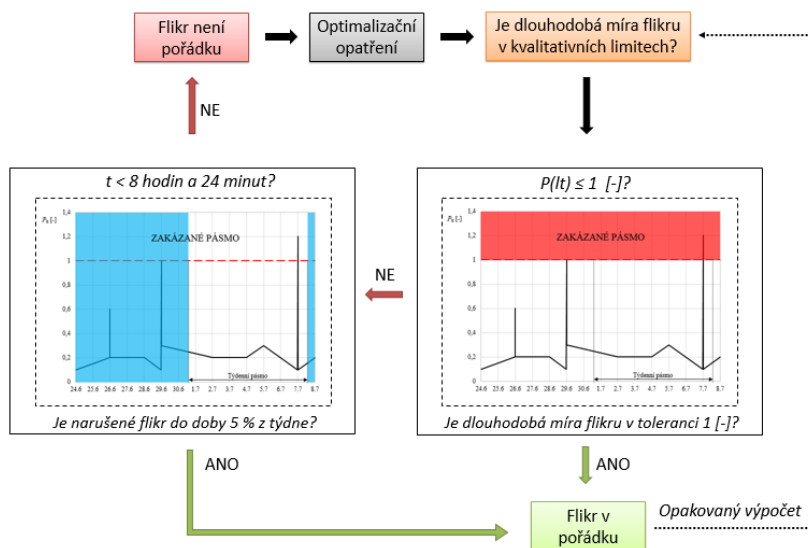
Na následujících obrázcích jsou algoritmy, ve kterých jsou probírány detailněji jednotlivé PPQ, které jsou v konceptu zahrnuté. Pokud některý z PPQ nevyhoví kritériím algoritmu a dostane se do bodu, kdy není v pořádku, musí nastat optimalizační opatření. Těmto opatřením je věnována kap. 1.3, avšak koncept počítá s využitím aktivního řízení spotřeby. Výsledkem těchto optimalizačních opatření a řízení spotřeby je denní diagram zatížení, který predikuje spínání zátěží. V algoritmech je využita i barevná logika, která se vyskytuje v oblastech grafů. Oranžová znamená hlídání stavu, který může být po normou stanovou dobu překročen. Červená vymezuje hranice velikosti maximálního limitu pro fluktuaci PPQ. Pokud dojde k překročení „oranžové“ meze, musí PPQ vyhovět červeně vymezeným hranicím, které mohou být v týdenním sledovaném okně, jež vytyčuje modré okno, max. po dobu, kterou stanovuje současná legislativa viz kap. 1.1. Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při harmonickém zkreslení napětí mimo normou stanovenou mez je ve zjednodušené formě, neboť je v něm mnoho duplicitních dotazů, které se liší pouze ve velikostech pro jednotlivé harmonické.



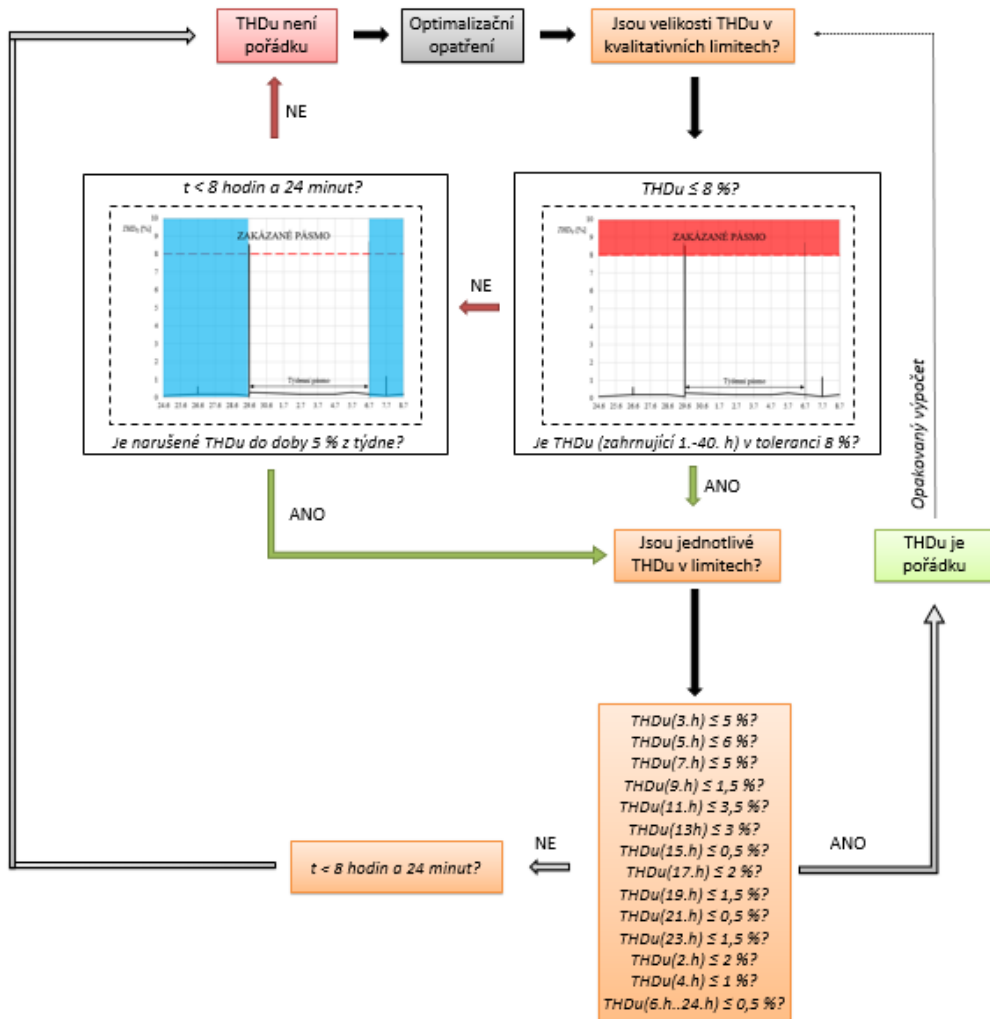
obr. 47 Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při fluktuaci frekvence mimo normou stanovenou mez



obr. 48 Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při kolísání napětí mimo normou stanovenou mez



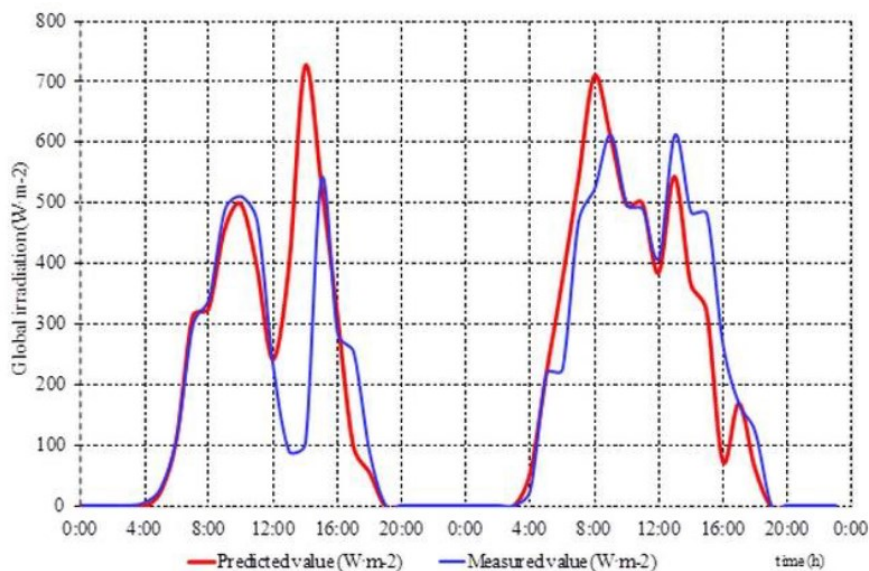
obr. 49 Algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při s dlouhodobé míře flickru mimo normou stanovenou mez



obr. 50 Zjednodušený algoritmus pro vyhodnocení optimalizace při harmonickém zkreslení napětí mimo normou stanovenou mez

## 4.2 Prediktivní nástroje

Vybudovaná testovací platforma (viz kap. 2.1) má také implementovaný systém prediktivních nástrojů. Tyto stávající nástroje jsou součástí koncepce algoritmu pro optimalizaci kvality elektrické energie v Off-Grid napájecím systému, a proto je zde, před implementací výsledného algoritmu, zmíněna jedna kapitola. Jedná se o předpovídající nástroje, které spolupracují s databázovými systémy a mohou se s časem zefektivňovat, což jsou prvotní znaky umělé inteligence.



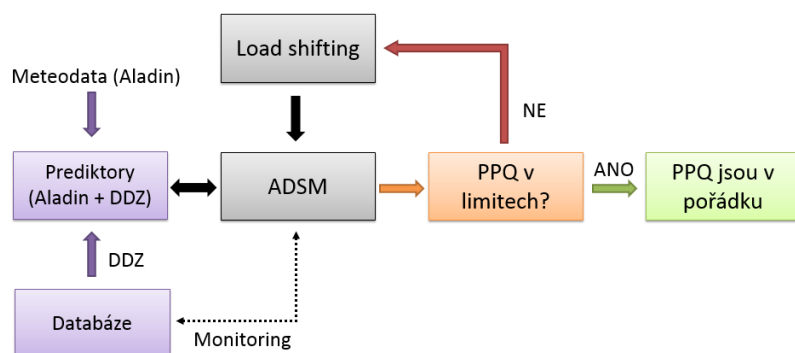
obr. 51 Srovnání predikovaných a naměřených hodnot pro úhrn slunečního svitu [33]

Pro optimalizaci toku výkonu v energetické jednotce bude využívána jako hlavní podpůrná informace predikce výroby elektrické energie z použitých obnovitelných zdrojů elektrické energie. Algoritmy výpočtů predikčních modelů jsou optimalizovány pro konkrétní využití energetické jednotky energeticky soběstačného domu. S využitím již vybudovaného detailního monitorovacího systému, který zaznamenává všechny relevantní hodnoty charakteristických veličin (elektrické, meteorologické a mechanické) do databáze dlouhodobých naměřených hodnot. Tato vytvořená databáze je následně normalizována a bude využita pro testování vybraných metod umělé inteligence. Cílem využití metod umělé inteligence je aplikace pro řízení toku energie pro respektování specifických požadavků energetické jednotky. Samotné aplikaci metod umělé inteligence pro systém řízení toku energie bude předcházet testovací provoz. Dle fyzikálních modelů, které demonstrují chování reálných spotřebičů v domácnosti, bude programována speciálně navržená zátěž simulující provoz a spotřebu „SMART domu“. V průběhu testovacího provozu budou aplikovány metody umělé inteligence pro řízení provozu na základě vytvořené normalizované databáze, přičemž „poslední slovo“ pro řízení bude mít supervizor, který bude mít možnost realizace dílčích zásahů prostřednictvím vzdálené správy. Po výběru a ověření metod umělé inteligence bude v závěru odzkoušen autonomní provoz energetické jednotky řízený SMART management systémem pro řízení autonomního provozu. [33]

Aplikaci těchto prediktorů lze vybudovat i na pracovišti Hardu pro optimalizační blok, který bude součástí celkové optimalizace toku energie v Off-Grid napájecím systému. Tento blok, který řeší optimalizační cyklus pro parametry kvality elektrické energie lze vidět na obr. 52. Pokud bude existovat dostatečně obsáhlá databáze s veličinami, které jsou relevantní pro vhodnou predikci parametrů kvality

elektrické energie, bude systém schopen odstraňovat narušení těchto sledovaných veličin ještě před samotným vznikem, tedy v jejich příčině. Takové řešení přináší invenci zejména v tom, že vzniklý problém s kvalitou elektrické energie neřeší optimalizačním prvkem po jeho výskytu, ale ještě před samotným výskytem. Optimalizačním prvkem pro řešení příčiny je tvorba denních diagramů zatížení, podle kterých bude spínána zátěž v napájecím systému takovým způsobem, aby nebyly překročeny limity kvality elektrické energie. Je zde využíváno tzv. posouvání spotřeby (load shifting).

Výstupy z prediktorů jsou v této aplikaci potřeba obecně dva. Prvním výstupem je informace o energetickém stavu. Tento stav řeší zdrojovou část. Informaci o predikci zdrojové části mohou zastat předpovědní modely počasí (např. Aladin) v kombinaci s databází aktuálně naměřených hodnot úhrnu slunečního svitu, teploty a výroby energie. Druhým výstupem je informace o spolehlivém stavu v napájecím systému, kterou řeší část v oblasti zátěží. Této oblasti musí dopomoci opět databáze naměřených relevantních hodnot PPQ i stavu zatížení v síti. Prediktory se mohou v čase zefektivnit svým neustálým zdokonalováním díky databázi naměřených hodnot a množstvím provedených iteračních kroků, které jsou monitorovány a posléze i zaznamenávány do databázového systému.



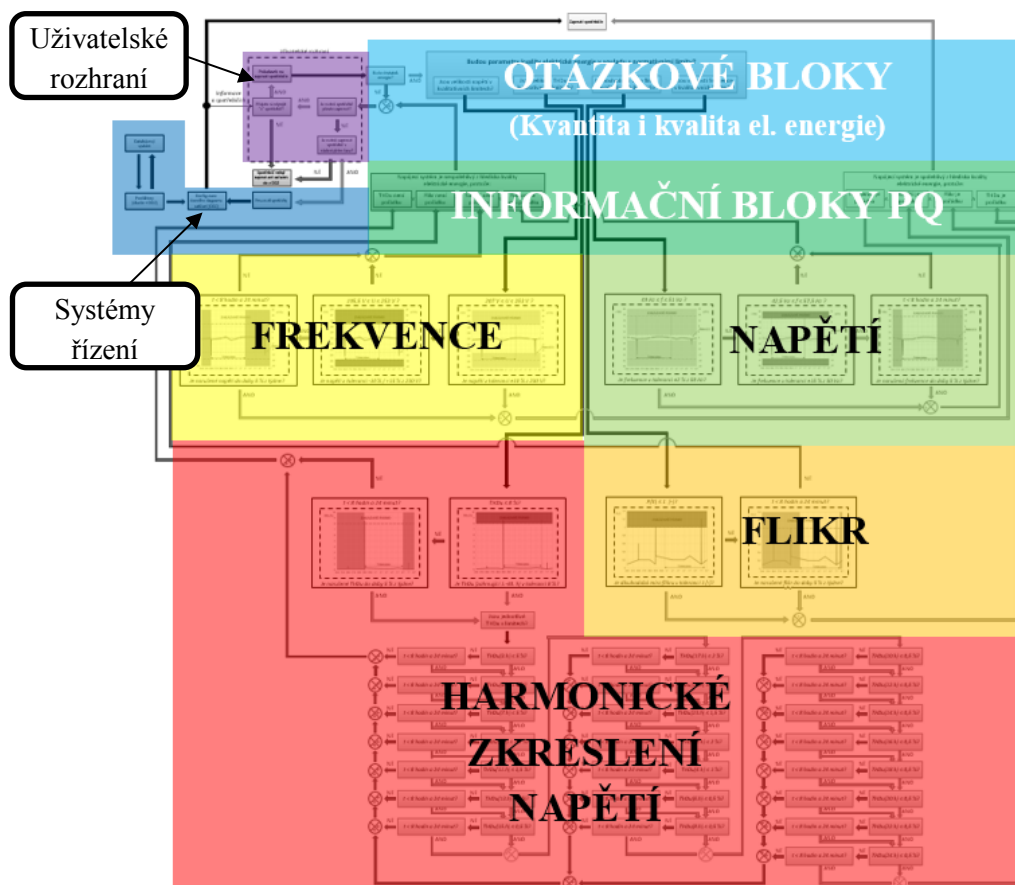
obr. 52 Obecné schéma optimalizačního cyklu pro PPQ s využitím prediktivních nástrojů

### 4.3 Implementace výsledného algoritmu pro optimalizaci PQ

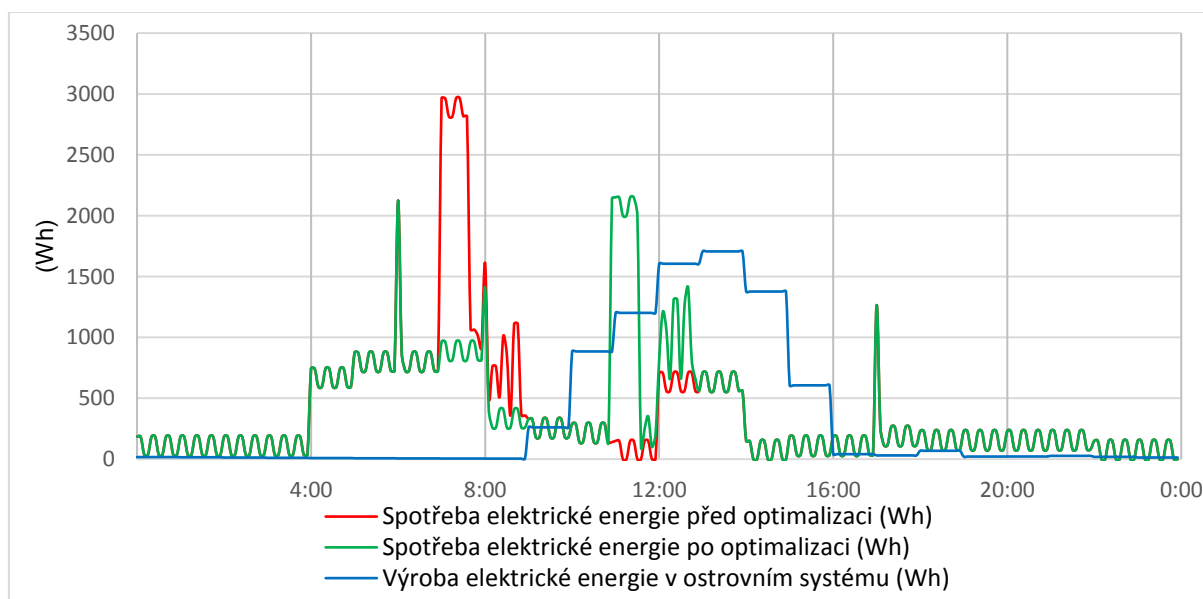
Tato kapitola je věnována celkovému složení všech přechozích myšlenek, principů a náležitostí, které jsou spjaty s legislativou, vybudovanou testovací platformou a optimalizačními prvky v napájecím systému. Navržený algoritmus eliminuje možné fluktuace napětí, frekvence, harmonického zkreslení nebo flikru mimo normou stanovenou mez. Pokud nastane stav, kdy je některé z parametrů kvality elektrické energie mimo kvalitativní limity, jedná se o nespolehlivý energetický systém. Tento blok, který řeší částečně optimalizaci Off-Grid systému, je zaměřen pouze na optimalizaci kvality elektrické energie. Je však součástí celkové optimalizace, která řeší energii. Prvním krokem iteračních výpočtů je požadavek, zdali je dostatek energie. Pokud je dostatek energie, pokračuje výpočet dál a ptá se, zda je energetický systém spolehlivý z hlediska PQ. Všechny jednotlivé bloky PPQ jsou probrány v předchozí kap. 4.1, která řeší jednotlivé vývojové diagramy. Na obr. 53 lze vidět pouze náhled celkového řešení algoritmu. Jelikož je výsledná implementace vývojového diagramu příliš rozsáhlá, je uvedena v čitelné podobě v příloze této diplomové práce. V tomto řešení jsou jednotlivé vyhodnocovací bloky seskupeny do jednoho vývojového diagramu, který řeší obecně optimalizaci energie, avšak detailněji optimalizaci kvality elektrické energie. Uživatelské rozhraní v současnosti funguje na platformě Quido, které lze vidět na obr. 24. Uživatel na něj může přistoupit ze vzdálených přístupů pomocí telefonu, tabletu nebo

## Koncepce algoritmu pro optimalizaci PQ v Off-Grid systému

osobního počítače. Součástí konceptu jsou také otázkové a informativní bloky, které musejí být s touto platformou propojeny. V současnosti funguje ADSM pouze pro řízení kvantity energie a reprezentuje ho samostatný otázkový blok. Jeho výsledek v praxi můžete vidět na obr. 54.



obr. 53 Orientační bloky implementovaného algoritmu pro optimalizaci PQ



obr. 54 Funkce ADSM pro energeticky soběstačný Off-Grid 21.3.2018

## Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout optimalizační algoritmus, díky kterému budou limity kvality elektrické energie v normou předepsaných mezích. Nejprve bylo nutné rozkrýt vrstvu legislativy. Tam dominuje stále norma ČSN EN 50160 ed. 3, která předepisuje limity kvality elektrické energie z hlediska maximální velikosti sledované veličiny po stanovený maximální čas. Určitou výhodou z hlediska tvorby algoritmu byly i benevolence, které normy, kodexy nebo pravidla pro provozování soustav definují pro napájecí systémy v režimu Off-Grid. Současná legislativa rozdílně definuje limity fluktuací frekvence dle způsobu napojení napájecího systému. V Off-Grid sítích může nastat kolísání kmitočtu až dvojnásobné velikosti ( $\pm 1$  Hz), než je tomu u napájecích systémů On-Grid. Navíc, po dobu přibližně 8 a půl hodiny, může frekvence kolísat až o  $\pm 7,5$  Hz. Tento časový údaj, který stanovuje maximální délku trvání dovoleného poruchového stavu, je určen pro každý libovolně zvolený týden. Další výhodou bylo, že je pro všechny sledované parametry kvality elektrické energie stejný. Poměrně nenápadný legislativní údaj vedl k tomu, že nebylo nutné v algoritmu zohledňovat sledování veličin v týdnech i rocích, a tím pádem provádět určitou optimalizaci sledování fluktuace frekvence při přestupném roce, jako by tomu bylo u On-Grid sítí. Dalšími sledovanými parametry jsou, kromě frekvence, kolísání napětí, činitel harmonického zkreslení napětí a dlouhodobá míra flikru. Všechny tyto sledované parametry mají v rámci první kapitoly provedeny grafické znázornění, které vhodným způsobem interpretují, za jakých okolností budou překročeny limity kvality elektrické energie, a za jakých ne. Stejný princip grafů se následně implementoval také do výsledného algoritmu pro názornější vysvětlení i s barevnou logikou. Vypuštěn byl pouze parametr kvality elektrické energie, který zohledňuje nesymetrii, protože je Off-Grid napájecí systém pouze jednofázový.

Jako další bylo nutné popsat aktuální testovací platformu na pracovišti Hard. Ten prošel několika revitalizacemi, které byly soustředěny zejména na unifikaci jednotlivých komponentů do jednoho funkčního bloku. Tato část práce je zaměřena na stávající funkční prvky, na které algoritmus bude napojen. Neřeší tak systémy spojené s větrnou elektrárnou detailněji jako např. popis rozvaděčů, které jsou na ni napojené apod. Současná platforma využívá aktivního řízení spotřeby, které dokáže efektivněji využít své zdroje v napájecím systému. Také je zde zmíněna část o prediktivních nástrojích, kterým je posléze věnována samostatná kap. 4.2. Popis jednotlivých rozvaděčů a zapojení Off-Grid systému je součástí příloh. S popisem testovací platformy souvisí také popis jednotlivých spotřebičů. Ten je součástí další kapitoly o návrhu kategorizace. V minulosti již byly provedeny kategorizace spotřebičů, pouze však pro řízení toku energie z hlediska soběstačnosti. Nový návrh počítá tak i s implementovaným blokem, který řeší spolehlivost, tedy kvalitu elektrické energie. Výsledkem je návrh relevancí jednotlivých spotřebičů. V tomto návrhu jsou nejdůležitější spotřebiče lednička a osvětlovací soustava. Méně důležité klimatizace a bojler. Skupinu nedůležitých spotřebičů tvoří např. televize nebo mikrovlnka, které budou v rámci optimalizačních cyklů s využitím posouvání spotřeby první na řadě. Kategorizování spotřeby pro optimální výpočetní cykly v algoritmu je poměrně složitý proces. Je nutné mít změřené veškeré kombinace spotřebičů, a to v různých provozních stavech sítě. Výsledkem jsou potom relevantní hodnoty, díky kterým lze predikovat ovlivnění sítě. Kvůli nedostatku naměřených relevantních hodnot, u kterých chybí zejména informace o připojených zařízeních, bylo provedeno pouze několik měření. Vyhodnocení proběhlo následně z části s využitím hypotéz, protože nebyly změřeny všechny kombinace připojených spotřebičů, které ovlivňují síť. Mezi ty patří také různé kombinace s využitím simulované zátěže, která má mnoho konfigurací. Měření má dlouhodobý



charakter a nebylo tedy možné určit velikosti ovlivnění parametrů kvality elektrické energie deterministicky, neboť od zadání diplomové práce až po současnost je na pracovišti Hardu omezen provoz Off-Grid systému kvůli 3 bateriím, které jsou mimo provoz. To má za následek snížené napětí na vstupu ostrovního měniče, který se chová nyní jiným způsobem. Relevantní hodnoty lze měřit pouze v rozsahu 0-30 % zatížení tohoto ostrovního měniče, zbylé hodnoty lze doměřit po výměně baterií nebo převzít uvedené hypotézy v kap. 3.

Po přechodu na stejnosměrnou topologii, je zkratový výkon Off-Gridu na Hardu dán ostrovním měničem. Při měření bylo zjištěno, že pokud je zatěžován ostrovní měnič nízkou zátěží, např. 15 % svého maximálního výkonu, jsou hodnoty harmonického zkreslení (proudu i napětí) vyšší než při stavu, kdy je ostrovní měnič provozován blízko svého pracovního bodu. Optimalizačním opatřením takové situace je dodání dalšího spotřebiče, nejlépe odporového charakteru (konvektor, rychlovarná konvice, simulace spotřeby s využitím odporníků atd.).

Nedílnou součástí algoritmu jsou databázové systémy. Záznamy pro tuto diplomovou práci jsou ukládány průměry z minutových intervalů a pocházejí ze stávajícího programu online monitoringu, který byl vytvořen v Labview. Do textového souboru exportují sledované veličiny pro každý den samostatně automaticky. Pro následné analýzy postačuje MS Excel. V rámci sledovaných parametrů kvality elektrické energie počítá legislativa s desetiminutovými průměry hodnot daných veličin. Součástí databáze však není informace o připojeném spotřebiči nebo zařízení. Řešením je vytvoření unikátního identifikačního kódu pro každou kombinaci spotřebičů zvlášť a zaznamenávat ji v čase s ostatními parametry. Tím bude zabezpečena zpětná vazba při vyhodnocování poruchových stavů sítě, neboť do současnosti neexistuje při vyhodnocení parametrů kvality elektrické energie informace o připojených spotřebičích.

Výsledný algoritmus je složen ze 4 hlavních bloků, které vyhodnocují sledované parametry kvality elektrické energie. Pokud některý z nich nevyhoví, musí nastat optimalizační cyklus, jenž může mít i více iteračních kroků s využitím posouvání zátěže. Cyklus může nastat ve dvou verzích. Buď uživatel chce zapnout zařízení a musí kvůli němu vypnout jiné s nejnižší relevancí dle kategorizace spotřeby nebo mu bude oznámen čas, kdy bude moct být spotřebič zapnut a algoritmus jej zařadí do denního diagramu zatížení. Funkce optimalizačního cyklu s využitím posouvání spotřeby je inovativní zejména v tom, že přináší řešení příčiny. Jeho přesnost je dána přesností informací, které využívají prediktivní nástroje. V případě energetické soběstačnosti, jež řeší kvantitu el. energie jsou těmito informacemi zejména úhrn slunečního svitu a teplota, podle kterých lze vyhodnotit budoucí dodávku el. energie. U dalšího bloku algoritmu, který zpracovává informace o energetické spolehlivosti napájecího systému, jsou v rámci prediktivních nástrojů informace o vzájemných interferencích spotřebičů se sítí, které reprezentují parametry kvality elektrické energie.

Ostatní optimalizační prvky (např. aktivní/pasivní filtry, symetrizační prvky atd.) řeší důsledek vzniku problémů spojených s kvalitou elektrické energie. Pro správnou funkci, chod a životnost zařízení nebo spotřebičů musí být dodržovány právě kvalitativní limity, které stanovuje legislativa. Algoritmus pro optimalizaci kvality elektrické energie může sloužit jako podklad pro realizaci aktivního řízení energií 2.0, který bude řešit optimalizaci energií jako celek. Ta zahrnuje stávající optimalizaci pro dostatek energie s novou integrací bloku pro dodržení kvalitativních limitů. Taková síť je poté energeticky soběstačná a vůči připojovaným zařízením i spolehlivá.



## Použitá literatura

- [1] J. Coufal, Bakalářská práce: Analýza kvality elektrické energie v ostrovních sítích, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2016.
- [2] ČEPS Invest, „ČEPS - přenosové schéma,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/rozvoj-ps>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [3] ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut, 2000.
- [4] P. Santarius, ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA, Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrických měření, 2007.
- [5] ČSN EN 61000-2-2: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí, Český normativní institut, 2002.
- [6] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 3 - KVALITA ELEKTRINY V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ, ZPŮSOBY JEJÍHO ZJIŠŤOVÁNÍ A HODNOCENÍ, PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV, 2006.
- [7] VŠB-FEI-KAT420, „Přednášky z předmětu Elektromagnetická kompatibilita,“ [Online]. Available: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/3\\_Harmonicke.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/3_Harmonicke.pdf). [Přístup získán 04 04 2018].
- [8] C. L. Derek Maule, Poklesy napětí - Zmírnění poklesu napětí, Anglie: European Copper Institute a Copper Development Association, 2003.
- [9] P. Krejčí, „Přednášky z předmětu Energetické rušení,“ v *Energetické rušení 1,2*, Ostrava, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2018.
- [10] S. Misak, L. Prokop a P. Bilik, „Power quality analysis in off-grid power system,“ v *2014 ELEKTRO*, Ostrava, 2014.
- [11] S. Mišák a L. Prokop, Provozní vlastnosti obnovitelných zdrojů, Vydání první editor, Ostrava: Asociace technických diagnostiků ČR, o.s., 2014.
- [12] EEX, „Load shifting,“ Australian Government Department of the Environment and Energy, Commonwealth of Australia, 2018.
- [13] J. Stuchlý, „Problematika provozu energeticky soběstačných domů“.
- [14] J. Vramba, Disertační práce: Vývoj koncepce chránění pro Off-Grid systém, 1 editor, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015.
- [15] „Hybrid Inverter,“ [Online]. [Přístup získán 2016-04-21].

- [16] „SUNNY ISLAND 6.0 H/ 8.0 H: sma.de. SMA SOLAR TECHNOLOGY AG,“ [Online]. Available: <http://www.sma.de/en/products/off-grid-inverters/sunny-island-60h-80h.html>. [Přístup získán 2016-04-21].
- [17] S. Misak, L. Prokop a P. . Kacor, „Results from hybrid off-grid power system operation analysis,“ *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp. 1-3, 2011.
- [18] S. Mišák, „Smartpower - návrh systému řízení,“ 04 04 2018. [Online]. Available: <http://smartpower.vsb.cz/Documents/ADSM.pdf>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [19] S. Mišák, „Sofistikovaný systém řízení energie pro zajištění celoroční energetické soběstačnosti provozu rodinného domu,“ *Technické zařízení budov, Info*, 2018.
- [20] S. Electric, „Conext ComBox - Komunikační zařízení,“ 04 04 2018. [Online]. Available: <https://www.schneider-electric.cz/cs/product-range-presentation/62089-conext-combox>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [21] ELCOM, „ENA330 (PQA),“ 04 04 2018. [Online]. Available: <http://www.elcom.cz/cz/produkty/merici-systemy/merici-systemy-pro-energetiku/pristroje/ena330>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [22] ELCOM, „BK-Report - Zpracování naměřených dat,“ 04 04 2018. [Online]. Available: <http://www.elcom.cz/cz/produkty/merici-systemy/merici-systemy-pro-energetiku/software-pro-mereni-a-analyzu/bk-report>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [23] KMB-Systems, „Analyzátor SMC 144,“ 04 04 2018. [Online]. Available: <http://www.kmb.cz/index.php/cs/digitalni-merici-pristroj-s-pameti/smc-144-pro-smart-metering>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [24] KMB-Systems, „Aplikace ENVIS,“ 04 04 2018. [Online]. Available: <http://www.kmb.cz/index.php/cs/aplikace/envis>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [25] S. Mišák, J. Stuchlý, J. Platoš a P. Krömer, „A heuristic approach to Active Demand Side Management in Off-Grid systems operated in a Smart-Grid environment,“ v *Energy and Buildings*, 2015.
- [26] Schneider-Electric, „WholeSaleSolar,“ 04 04 2018. [Online]. Available: <https://www.wholesalesolar.com/cms/schneider-conext-xw7048e-export-inverter-installation-manual-3551255610.2430072.pdf>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [27] S. Electric, „Střídač/nabíječ - Conext SW,“ 01 01 2017. [Online]. Available: <https://www.schneider-electric.cz/cs/product-range-download/61645-conext-sw?parent-category-id=7000&parent-subcategory-id=7010#tabs-top>. [Přístup získán 04 04 2018].
- [28] J. Stuchlý a T. Sikora, „Generic Loads for Testing of Low Voltage Inverters for Off-Grids,“ *Centrum ENET, Ostrava*, 2015.

- [29] J. Stuchlý, Development of Active Demand Side Management for Energy Units, sv. Disertační práce, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2015.
- [30] T. Vantuch, S. Mišák, T. Jeżowicz, T. Buriánek a V. Snášel, „The Power Quality Forecasting Model for Off-Grid System Supported by Multiobjective Optimization,“ v *Transactions on Industrial Electronics*, Web, IEEE, 2017, pp. 9507-9516.
- [31] S. Mišák, „A Power Quality Forecasting Model as an Integrate Part of Active Demand Side Management using Artificial Intelligence Technique – Multilayer Neural Network with Backpropagation Learning Algorithm,“ VŠB – TUO, FECS, DPEE, Ostrava, 2015.
- [32] M. Kříž, „Návrh energetické koncepce bytového komplexu s napájením z obnovitelných zdrojů,“ Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2016.
- [33] S. Mišák, „Článek: Predikce výroby a řízení toku výkonu pro koncepci SMART GRID rodinného domu,“ 04 04 2018. [Online]. Available: [http://www.stanislaw-misak.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=105:predikce-vyroby-a-rizeni-toku-vykonu-pro-koncepci-smart-grid-rodinneho-domu&catid=59&Itemid=1046](http://www.stanislaw-misak.com/index.php?option=com_content&view=article&id=105:predikce-vyroby-a-rizeni-toku-vykonu-pro-koncepci-smart-grid-rodinneho-domu&catid=59&Itemid=1046). [Přístup získán 04 04 2018].

## Seznam příloh

Detailní popis testovací platformy na pracovišti HARD .....	- I -
Implementace optimalizačního algoritmu PQ pro pracoviště HARD.....	- II -